

HOLOGRAPHISCHE ZEICHENERKENNUNG DURCH EINFACHE UND RAUMMULTIPLEXE KORRELATIONSMETHODEN

mit Beiträgen über

1. die Prüfung von Photomasken durch Amplitudenfilterung und
2. ein Verfahren zur Direktzeitwandlung der Zeicheninformation
in transparenter Form mit Hilfe thermoplastischer Materialien

Nikolaos Douklias

München 1974



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556029_0054

HOLOGRAPHISCHE ZEICHENERKENNUNG
DURCH
EINFACHE UND RAUMMULTIPLEXE
KORRELATIONSMETHODEN

mit Beiträgen über

1. die Prüfung von Photomasken durch Amplitudenfilterung und
2. ein Verfahren zur Direktzeitwandlung der Zeicheninformation
in transparenter Form mit Hilfe thermoplastischer Materialien

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DES DOKTORGRADES

DER

FAKULTÄT FÜR PHYSIK

DER

LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

vorgelegt

von

Nikolaos Douklias

aus

Kertezi/Griechenland



1. Referent: Priv. Doz. Dr. H.W. Schrötter
2. Referent: Prof. Dr. R. Röhler

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juli 1974

IN DANKBARKEIT MEINEN ELTERN
UND
MEINER FRAU

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	<u>Einleitung und Aufgabenstellung</u>	1
2.	<u>Kurzer Überblick über die Beziehung kohärent-optischer Filterverfahren zur Bionik</u>	5
3.	<u>Phänomenologische Betrachtungen und theoretische Grundlagen</u>	7
3.1.	Entstehung und Eigenschaften des Raumfrequenzspektrums (phänomenologisch)	8
3.2.	Theoretische Grundlagen	16
3.2.1.	Kohärentoptische Amplitudenfilterung	16
3.2.2.	Holographische (angepaßte) Filterung	20
4.	<u>Experimentelle Aufbauten sowie Entwicklung spezieller Vielkanalkorrelationssysteme und weiterer Systemkomponenten</u>	23
4.1.	Beschreibung der Systeme zur Amplituden- und einfachen holographischen Filterung	24
4.2.	Bekannte Vielkanalkorrelationssysteme	31
4.3.	Entwicklung, Vergleich und teilweise Erprobung eigener Vielkanalkorrelations- methoden	35
4.3.1.	Verfahren zur parallelen Filteransteuerung mit Hilfe holographisch erzeugter Objekt- beleuchtungswellen	36
4.3.2.	Einfache Gitter als sequentielle und quasiparallele Beleuchtungswellenerzeuger	37
4.3.3.	Wirkungsgrad bei paralleler und sequen- tieller Filteransteuerung	40
4.3.4.	Signal-Störlicht-Verhältnisse und Or- ganisationsform der Detektorelemente	42
4.3.5.	Schalteranordnung zur schnellen und präzisen Kanalansteuerung	47

4.3.6.	Sequentiell ansteuerbare Vielkanal- korrelationssysteme mit einer einfachen Keilplatte als Beleuchtungswellen- erzeuger	49
4.3.6.1.	Vielkanalkorrelationssystem mit niedrigen Filteransteuergeschwindig- keiten	50
4.3.6.2.	Vielkanalkorrelationssystem mit höheren Filteransteuergeschwindigkeiten	53
4.3.6.3.	Lesegeschwindigkeit	56
4.3.7.	Vorschlag zur Erhöhung der Filter- kapazität durch Verwendung einer Keil- platte mit einem Winkelvielfach	58
4.3.8.	Weitere Probleme und mögliche Lösungswege	62
5.	<u>Methodisches</u>	64
5.1.	Meß- und Prüfmethode	65
5.1.1.	Qualitative Methoden	65
5.1.2.	Quantitative Methoden	67
5.2.	Optimierung und Reproduzierbarkeit der Filterhologramme mit dazugehörigen experimentellen Ergebnissen	69
6.	<u>Experimentelle Ergebnisse und ihre Diskussion</u>	78
6.1.	Amplituden- und holographische Filtermethoden	78
6.1.1.	Erkennung von Fehlern an Photomasken durch Amplitudenfilterung in der Raum- frequenzebene	78
6.1.2.	Zeichenerkennung durch einfache holographische Filterung	84
6.1.2.1.	Beispiel zur Erkennung alphanumerischer Zeichen	84
6.1.2.2.	Identifizierung von Fingerabdrücken	86

6.1.2.2.1.	Einfluß von Verzerrungen und verschieden großen Fingerabdruckflächen	86
6.1.2.2.2.	Winkelabhängigkeit des Korrelationsprozesses	90
6.1.2.2.3.	Einfluß der Trägermaterialien	92
6.1.2.2.4.	Schlußbemerkungen	94
6.1.2.3.	Klassifizierung von Fingerabdrücken	94
6.1.2.3.1.	Verfahren	96
6.1.2.3.2.	Experimentelle Ergebnisse	98
6.1.2.3.3.	Schlußbemerkungen	99
6.1.3.	Zeichenerkennung durch raummultiplexe Vielkanalkorrelation	100
6.1.3.1.	Parallele Vielkanalkorrelation mit geringer Kanalzahl	100
6.1.3.2.	Sequentieller Vielkanalkorrelator mit niedrigen Ansteuerungsgeschwindigkeiten	103
6.1.3.3.	Sequentieller Vielkanalkorrelator mit höheren Ansteuerungsgeschwindigkeiten	112
6.2.	Weitere spezielle Untersuchungsergebnisse	114
6.2.1.	Einfluß von Zeichenfehlern auf das Erkennungssignal	114
6.2.1.1.	Einfluß reeller Zeichenfehler	116
6.2.1.2.	Einfluß von simulierten Zeichenfehlern	120
6.2.1.3.	Einfluß der Randfeinstruktur maschinengeschriebener Zeichen	124
6.2.1.4.	Schlußbemerkungen	128
6.2.2.	Einfluß der Photoschichtdicke der Filterhologramme auf das Erkennungssignal	128
6.2.3.	Einsatzmöglichkeit von thermoplastischen Materialien als Direktzeitwandler bei der kohärentoptischen Zeichenerkennung	131
6.2.3.1.	Zum Prinzip der Direktzeitwandlung mit thermoplastischen Materialien	132
6.2.3.2.	Experimentelle Ergebnisse	136
6.2.3.3.	Schlußbemerkungen	138

IV

	Seite
7. <u>Zusammenfassung</u>	141
Anhang A	148
Anhang B	156
8. <u>Schrifttum</u> mit anschließendem Ver- zeichnis der zur vorliegenden Arbeit gehörenden Veröffentlichungen, Vorträge und Patentanmeldungen	164

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Der Begriff „Zeichenerkennung“ ist so alt wie die erste Kommunikationsfähigkeit zwischen lebenden Organismen überhaupt und bedeutet die Zuordnung (Abbildung, Zuteilung) der Zeichen, die von der Natur und den Organismen selbst eingeführt wurden, zu ihrer Bedeutung.

Sieht man von akustischen Zeichen ab, so liegt die für den Menschen bestimmte Zeicheninformation hauptsächlich in geometrischer Form als Schwarz-Weiß-Verteilung vor, weil das Wahrnehmen am einfachsten mit dem Auge geschehen kann. Der Erkennungsprozeß ist deshalb naturgemäß von Form, Größe, Lage, Kontrast, Rauschuntergrund und anderen derartigen Abweichungen von der Normalform der Zeichen weitgehend unabhängig.

Die Funktion der Informationsverarbeitung, d.h. die logische Zeichenzuordnung, wurde bis zum praktischen Einsatz des Lochstreifens (im 18. Jahrhundert) zur Steuerung von Webstühlen und der in unserer Zeit wohlvertrauten Lochkarte ausschließlich und vorbildlich vom menschlichen Gehirn übernommen.

Die Zeichenerkennung hat jedoch insbesondere in den letzten drei Jahrzehnten eine andere Bedeutung bekommen. Man versteht darunter nicht mehr die biologische, sondern in erster Linie die automatische, d.h. die maschinelle Zeichenerkennung /1-6/, der auch die vorliegende Arbeit zuzuordnen ist. Die Einführung der automatischen Zeichenerkennung ist sehr eng mit den raschen Entwicklungen auf dem Sektor der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) verknüpft. Durch die Automatisierung des Erkennungsprozesses soll das Gleichgewicht zwischen der Verarbeitungsleistung einerseits und der Datenerfassung andererseits erhalten, bzw. ein Mißverhältnis vermieden werden. Zeichenerkennungssysteme sind somit Peripheriegeräte moderner EDV-Anlagen und haben die Aufgabe, menschliche Funktionen wirkungsvoller zu übernehmen und auszuführen.

Die ersten automatischen Zeichenerkennungssysteme - auch Lesegeräte genannt - wurden in der Praxis vor ca. 35 Jahren /7-8/ eingesetzt. Ihre Leistungsfähigkeit ist im Laufe der Zeit sehr rasch verbessert worden. Moderne und im Einsatz befindliche Systeme /9/ können bei 214 unterschiedlichen Zeichenklassen (und einem Preis von 6 Mill. DM) bereits bis zu 14 000 Zeichen pro Sekunde erkennen. Außer Ziffern gehören dazu auch sämtliche kleinen und großen Buchstaben Alphabetes sowie eine bestimmte Anzahl von Sonderzeichen /10/. Alle diese Zeichen, die man unter dem Begriff „Alphanumerische Zeichen“ zusammengefaßt hat, bilden nach wie vor den Schwerpunkt der maschinellen Zeichenerkennung. Als Kriterium wird der optische Remissionsgrad verwendet. Die Anwendungsgebiete sind in erster Linie das Bankwesen (z.B. zur automatischen Erfassung der Scheckdaten), das Postwesen (z.B. zur automatischen Briefsortierung) und die Industrie.

Durch die Erfindung des Lasers als kohärente Lichtquelle /12/ und die Realisierung der holographischen Idee /13/ (als Folge dieser Kohärenzeigenschaft des Laserlichtes) ist in den letzten Jahren sowohl die Anzahl der zweidimensionalen Objektverteilungen gewachsen - die zumindest im Prinzip maschinell verarbeitet werden können - als auch die Beziehung zwischen Optik und Datenverarbeitung enger geworden /14-17/, weil die Kohärenz des Laserlichtes auch für die Informationsverarbeitung wichtige technische Vorteile bietet. Außer der kohärentoptischen Erkennung alphanumerischer Zeichen /18-19/, deren Struktur relativ einfach ist, liefert die Holographie weitere prinzipielle Voraussetzungen zur parallelen und automatischen Verarbeitung auch von komplexeren Objektverteilungen, wie beispielsweise Fingerabdrücken /20-23/. Folgende Beispiele stellen eine kleine Auswahl von Objekten und eindimensionalen Signalen dar, die kohärentoptisch verarbeitet werden können. Dazu gehören: Bildaufnahmen /24-26/, Spracherkennung /27/, Blutkörperchen /28-29/, Blasenkameraufnahmen /30/, elektrische Signale (z.B. Radarsignale) /31-32/, Fehler in Photomasken

/33-36/ u.a.¹⁾.

Die wichtigsten prinzipiellen Vorteile der kohärentoptischen Verfahren im Vergleich zu den üblichen Methoden der seriellen Bildabtastung sind 1) die parallele Informationsverarbeitung, und damit die unvergleichbar hohe Rechengeschwindigkeit, 2) die Invarianz des Erkennungsprozesses gegenüber Objekttranslationen und 3) der geringe materielle Aufwand. Durch theoretische Überlegungen /18/, die den praktischen Gegebenheiten angepaßt waren, wurde die erstaunlich hohe Anzahl von 4×10^{12} parallel durchführbaren Rechenoperationen ermittelt; elektronische Datenverarbeitungsanlagen erreichen dagegen zur Zeit ca. 10^7 bit/s; vgl. auch /37-38/ und Seite 56 dieser Arbeit. Die Eigenschaft der Invarianz ist bei Korrelationsprozessen von großer technischer Bedeutung, weil dadurch die sonst aufwendigen Justierarbeiten vermieden werden können. Diesen Vorteilen stehen jedoch eine Anzahl gravierender Nachteile gegenüber. Dazu zählen 1), daß bei der kohärentoptischen Informationsverarbeitung die Objektinformation in vielen Fällen nicht direkt, z.B. von Papierunterlagen, verarbeitet werden kann und 2), daß dieses Verfahren sehr stark von der Rotationslage und von der Druckqualität der Objekte (insbesondere der alphanumerischen Zeichen) abhängig ist.

Das erste Hauptziel der in dieser Arbeit behandelten Untersuchungen und angewandten Methoden war deshalb einerseits die Ermittlung der technischen Voraussetzungen, unter denen die oben erwähnten Vorteile bei wirkungsvoller Umgehung der damit zusammenhängenden Nachteile zur Lösung praktischer

¹⁾ Die Erweiterung der Anwendbarkeit optischer Erkennungsverfahren auf eine größere Anzahl von Objekten hat dazu geführt, daß der Begriff "Zeichenerkennung" (englisch: Character Recognition) nun nur für die Erkennung alphanumerischer Zeichen gilt. Für die übrigen Objekte hat sich der Begriff "Mustererkennung" (englisch: Pattern Recognition) durchgesetzt.

Probleme ausgenutzt werden können, und andererseits die Abschätzung des dazu erforderlichen Aufwandes (vgl. Abschnitt 4). Zuerst beschränkten wir uns vorwiegend auf einfache kohärentoptische Amplitudenfilterverfahren zur Erkennung von fehlerhaften Stellen in Photomasken (6.1.1), die in der Herstellungstechnik von integrierten Halbleiterbauelementen verwendet werden und in transparenter Form vorliegen, sowie auf die Erprobung des bekannten holographischen Verfahrens 1) zur Identifizierung und Klassifizierung von Fingerabdrücken und 2) zur Erkennung alphanumerischer Zeichen (6.1.2). Im Gegensatz zu den Fällen der einfachen Amplitudenfilterung und (im Prinzip auch) der holographischen Identifizierung von Fingerabdrücken ist jedoch sowohl für die Klassifizierung der Fingerabdrücke als auch für die Erkennung alphanumerischer Zeichen nicht ein einzelnes Filter, sondern für sämtliche anatomischen Fingerabdruckmerkmale bzw. Zeichen (z.B. Ziffern und Buchstaben) jeweils ein Filtersatz erforderlich. Eine hohe Filterzahl ist außerdem auch notwendig, wenn beispielsweise zur Unterdrückung der Rotationsabhängigkeit des Filterprozesses für bestimmte Rotationslagen der Objekte zusätzliche Filter benötigt werden.

Die Prüfung der Eignung der in der Fachliteratur beschriebenen Verfahren (6.2) sowie die Entwicklung und Erprobung eigener Methoden zur Herstellung und Ansteuerung derartiger Filtersätze mit Hilfe sog. Vielkanalkorrelationssysteme (englisch: Multi-Channel Correlator) bildeten deshalb einen weiteren Schwerpunkt unserer Untersuchungen (4.3, 5, 6.1.3). Als Endprodukt dieser Experimente wurde die Erstellung eines praxisnahe orientierten, weiterentwickelten Laboraufbaues zur Erkennung der Ziffern 0 bis 9 (in Diaform auf Glasplatten) einer genormten Schrift vorgesehen (6.1.3.3). Es erschien schließlich sinnvoll, Lösungswege zur Direktzeitwandlung der auf Papier vorliegenden Zeicheninformationen in transparenter Form zu entwickeln und auf ihre Eignung zu prüfen (6.2.3).

Dazu gehören auch Untersuchungen über den Einfluß von Zeichenfehlern und der Photoschichtdicke der Filterhologramme auf das Erkennungssignal (6.2.1 bzw. 5.2.2).

2. Kurzer Überblick über die Beziehung kohärentoptischer Filterverfahren zur Bionik

Die raschen technologischen Fortschritte, die während der letzten zwei Jahrzehnte auf dem Sektor der EDV zu verzeichnen waren und der damit zusammenhängende Bedarf an leistungsfähigen Datenerfassungssystemen - zu denen auch die automatische Zeichenerkennung gehört - haben in den Anfängen der sechziger Jahre zur Geburt einer neuen interdisziplinären Wissenschaft, der „Bionik“ geführt.

Als Hauptaufgabe dieser Wissenschaft, deren Grenzgebiete einerseits die Biologie und Medizin und andererseits die Kybernetik sind, wird in /39/ „die Anwendung technischer Untersuchungs- und Beschreibungsmethoden auf biologische Systeme hoher Leistungsfähigkeit und Übertragung der gewonnenen Einsichten über Funktionen und Strukturen auf technische Aufgabenstellungen mit dem Ziel, neue und leistungsfähigere Stoffe, Geräte, Verfahren und Systeme zu gewinnen“ angegeben¹⁾. Aus dieser Aufgabenformulierung geht hervor, daß der Mensch die im Laufe von Millionen von Jahren von der Natur entwickelten Speicher und Informationsverarbeitungsprinzipien und deren hervorragende Eigenschaften intensiver als bisher zu studieren und gegebenenfalls auch auszunützen versucht. Als biologisches Modellbeispiel dient dabei - wegen seiner besonderen Bedeutung - hauptsächlich das System Auge - Gehirn. An derartigen biologischen Systemen konnten bisher durch komplizierte neurobiologische Untersuchungen wichtige Eigenschaften, wie z.B. das Wahrnehmen, die Übertragung, die Speicherung und die parallele Verarbeitung von Informationen eingehend erforscht und studiert werden /40/. Da, wie im Abschnitt 1 erwähnt wurde, die Eigenschaft der parallelen Informationsverarbeitung auch eine

1) Bei der Formulierung dieser Aufgabenstellung wurde die Thematik des ersten Bionik-Kongresses vom Jahr 1960 in Dayton, Ohio, zugrunde gelegt.

charakteristische Eigenschaft kohärentoptischer Filterverfahren ist, stellen derartige kohärente Informationsverarbeitungssysteme erste praktische Beispiele zur Simulation von biologischen Funktionen mit einfachen Mitteln dar; vgl. auch /41-42/.

Weitere interessante Eigenschaften biologischer Systeme sind die hohe Kapazität, der geringe Platzbedarf und Energieverbrauch, die hervorragende Anpassungs- und Kombinationsfähigkeit, die Form der Entscheidungsbildung, die Organisationsform des Gedächtnisses, die Variationsbreite¹⁾ u.a.. Zu den wichtigsten Vorteilen künstlicher (technischer) Zeichenerkennungssysteme zählen dagegen die relativ geringe Fehlerrate, die wesentlich höhere Erkennungsrate (als z.B. bei der visuellen Erkennung alphanumerischer Zeichen durch den Menschen), die seltenere „Ermüdung“ und das bei Erfüllung von einigen technischen Voraussetzungen (z.B. keine Unterbrechung der Stromversorgung) teilweise bessere Erinnerungsvermögen. Es sei noch bemerkt, daß diese Vorteile der künstlichen Systeme größtenteils nur unter Verzicht auf andere wichtige Eigenschaften (z.B. Variationsbreite) sinnvoll ausgenutzt werden können. Allgemein betrachtet sind also die künstlichen Informationsverarbeitungssysteme spezifisch orientiert (d.h. relativ „beschränkt“ einsetzbar) und werden deshalb oft als „Idioten“ bezeichnet.

Die Grundelemente des Gehirns, das ein äußerst kompliziertes Gebilde darstellt, sind die Nervenzellen (Neuronen) /43/, an die die von der Umwelt durch die Rezeptoren empfangenen Informationen in Form codierter, elektrischer Stromimpulse gelangen. Nachdem die Informationen bereits in diesem Stadium sehr stark reduziert worden sind, werden sie anschließend in der gleichen Form von elektrischen Impulsen über die Nervenfasern parallel an andere Nervenzellen geleitet, wo die

1) Als „Variationsbreite“ ist nach /11/ der Grad der zulässigen Abweichungen der Zeichen von dem optimalen und genormten Zustand definiert.

endgültige Entscheidungsbildung in etwas komplizierterer, jedoch bereits weitgehend geklärter Weise geschieht. Das menschliche Gehirn enthält insgesamt ca. 10 bis 100 Milliarden derartiger Nervenzellen, von denen der größte Teil für die Informationsverarbeitung reserviert ist. Die Retina des Menschen belegt ca. 1 Million Zellen. Die Rezeptoren (Empfänger) selbst sind nach den Sinnesorganen in Gruppen unterteilt. Sie sind so gestaltet und verteilt, daß sämtliche Formen der Umweltinformationen, die z.B. durch Reize von Licht, Druck, Geschmack, Schall, Temperatur o.ä. entstehen, wahrgenommen werden können.

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, sei nach diesem kurzen Überblick auf die Literaturstellen /1,4,44-53/ verwiesen, die weitere und detailliertere Einzelheiten über die funktionellen Zusammenhänge der Informationsverarbeitung in künstlichen bzw. in natürlichen Systemen enthalten.

3. Phänomenologische Betrachtungen und theoretische Grundlagen

Das physikalische Grundprinzip, auf dem die kohärentoptische Zeichenerkennung basiert, ist relativ alt. Vor fast 100 Jahren hatte Abbe /54/ erkannt, daß, wenn ein nicht selbstleuchtendes transparentes Objekt beleuchtet wird, in der Brennebene einer Sammellinse die vollständige Objektinformation in impliziter Form erhalten werden kann, und daß sich diese Information durch gezielte Eingriffe in einfacher Weise vorteilhaft beeinflussen läßt. Diese Erscheinung ist in erster Linie auf die Beugung des Lichtes an den Objektkanten zurückzuführen. In diesem Kapitel werden deshalb die dazugehörigen physikalischen Vorgänge phänomenologisch betrachtet und die theoretischen Grundlagen in kurzer und abgeschlossener Form nur soweit erläutert, wie es für das Verständnis der in dieser Arbeit behandelten Filterverfahren erforderlich ist. Nach der phänomenologischen Betrachtung der Entstehung der

Objektinformation in der Brennebene der Linse werden die Lichtverteilungen vor dem Objekt, in dem Raum zwischen Objekt und Linse, sowie in dem Raum zwischen Linse und deren hinterer Brennebene theoretisch behandelt. Weiterhin werden die holographische Speicherung der in der Brennebene der Linse entstandenen Objektinformation und schließlich das Prinzip der holographischen Zeichenerkennung durch Autokorrelation diskutiert. Eine detailliertere Beschreibung darüber findet man z.B. in /14,16,17,55-59/.

3.1. Entstehung und Eigenschaften des Raumfrequenzspektrums (phänomenologisch)

Die Entstehung der Objektinformation 2 bei paralleler Beleuchtung 1 in der Brennebene 4 einer Sammellinse 3, d.h. die Fraunhofersche Betrachtungsweise der Objektinformation ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

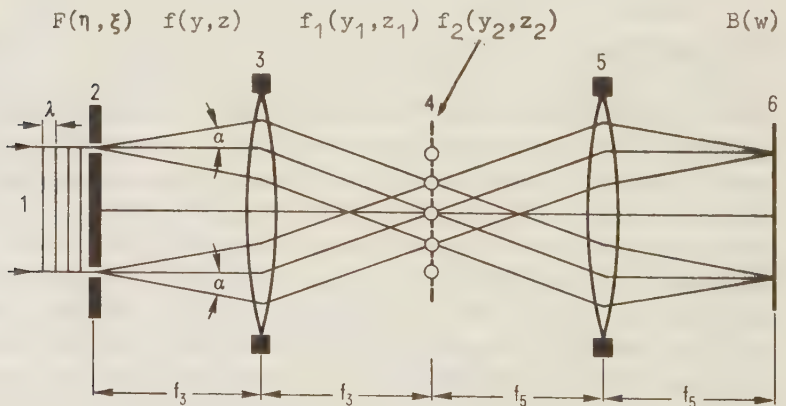


Bild 1. Schematische Darstellung zur Erläuterung der Entstehung und der Eigenschaften des Raumfrequenzspektrums. 1 Ebene Welle (Laser), 2 Objektebene, 3 Transformationslinse, 4 Raumfrequenz- bzw. Filterebene, 5 Rücktransformationslinse, 6 Bildebene

Als Objekt 2 wurde der Einfachheit halber ein Doppelspalt gewählt. Es ist weiterhin vorauszusetzen, daß die Spaltbreiten größer als die Lichtwellenlänge sind. Beleuchtet man nun dieses Objekt mit einer ebenen, monochromatischen und kohärenten Lichtwelle 1, so entstehen bekanntlich (nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip) an den einzelnen Punkten der Objektkanten infolge der Beugung elementare Lichtwellen, die sich kugelförmig ausbreiten. Das Licht dagegen, das den Spalt zwischen den Kanten passiert, pflanzt sich unbehindert und geradlinig bis zur Linse fort. (Die Linse vereinigt es anschließend im hinteren Brennpunkt, der auf der optischen Achse liegt.) Wegen der Wellennatur des Lichtes kommen Lichtbündel, die sich nach Verlassen des Objektes treffen, zur Interferenz und erzeugen je nach Gangdifferenz abwechselnd Intensitätsmaxima und -minima. Nach Durchgang dieser Lichterregungen, die sich in wohldefinierten, jedoch unterschiedlichen Richtungen ausbreiten, durch die Sammellinse, entstehen in deren hinterer Brennebene 4 scharfe, periodische, zur optischen Achse symmetrische und wegen der Kohärenzeigenschaft der Lichtquelle stationäre Lichtpunktverteilungen. Als derartige Demonstrationsbeispiele zeigen die Aufnahmen in Bild 2 die in der Brennebene einer Sammellinse bei Beleuchtung der Buchstaben H (links) und O (rechts) entstandenen Lichtverteilungen.

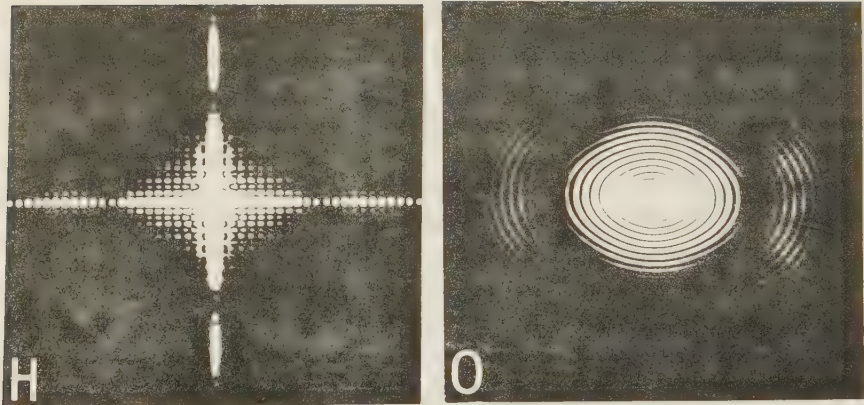


Bild 2. Raumfrequenzspektren der Buchstaben H und O
(mit freundlicher Genehmigung des U.S. Navy
Electronics Laboratory, San Diego/California)

Die Information der zwei senkrechten Linien (Spalte) des Buchstabens H, der als Demonstrationsbeispiel gewählt wurde, weil er sowohl die Information des hier betrachteten Objektes (Doppelspalt) als auch die Information des einfachen Spaltes (waagrechtcr Balken von H) enthält, in der Brennebene ist in denjenigen Lichtpunkten enthalten, die auf der waagrechtcn Linie liegen. Die Information von geometrisch gleichgerichteten, d.h. von parallelen Objektinformationen liegt also in der Brennebene auf einer Geraden, die senkrecht zu der Richtung der Objektstrukturen ist. Dieses Verhalten ist, wie wir im folgenden sehen werden, eine wichtige Eigenschaft, weil sie in der kohärentoptischen Filterung vorteilhaft ausgenützt werden kann. Die Information der waagrechtcn Buchstabenlinien ist entsprechend in denjenigen Lichtpunkten der Aufnahme enthalten, die auf der senkrecht dazu verlaufenden Geraden liegen. Die Lichtverteilung des Buch-

stabens 0, der nur runde Anteile enthält, besteht dagegen aus konzentrischen hellen und dunklen Ringen.

In Analogie zu der Definition der „Frequenz“ bei zeitabhängigen Funktionen in der Elektrotechnik und im Zusammenhang mit der kohärentoptischen Zeichenerkennung nennt man die gesamte Lichtverteilung, die im Fernfeld entsteht, das „Raumfrequenzspektrum“ und die einzelnen Lichtpunkte entsprechend die „Raumfrequenzkomponenten“ des Objektes¹⁾. In der klassischen Fachliteratur findet man dagegen statt „Raumfrequenzkomponente“ den Namen „Beugungsnebenmaxima“. Bei passender Dimensionierung der Spaltbreite der beugenden Strukturen und bei Verwendung geeigneter Linsenaperturen enthält das RFS in impliziter Form die vollständige Objektinformation. In der Abbeschen Theorie zur mikroskopischen Bildentstehung wird es deshalb als „primäres Bild“ bezeichnet. Der Fall, daß das RFS nicht die vollständige Objektinformation enthält, tritt auf, wenn der Abstand (vgl. auch Gleichung 1) zwischen den Kanten der beugungswirksamen Objektstrukturen einerseits und der Linsenapertur andererseits relativ klein ist, oder, wenn der Abstand zwischen Objektenebene und Linse groß ist. Beide Fälle können sowohl einzeln als auch kombiniert dazu führen, daß nur ein Teil des gebeugten Lichtes die Linsenapertur erreicht. Der Beugungswinkel α und damit auch der Abstand Δx zwischen zwei benachbarten Minima lassen sich aus folgenden Gleichungen berechnen:

$$\sin \alpha_k = k \frac{\lambda}{d} \quad (\lambda \text{ Lichtwellenlänge, } k = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

bzw.

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda \cdot f}{d} \quad (f \text{ Brennweite}) \quad (2)$$

Durch k wird also der Abstand der einzelnen Raumfrequenzkomponenten (bzw. Beugungsnebenmaxima) von dem zentralen Maximum ($k = 0$) des ungebeugten Lichtes bestimmt.

¹⁾ Beide Begriffe werden im folgenden abgekürzt mit „RFS“ bezeichnet.

Die Intensität I_a in jeder beliebigen Winkelrichtung α kann nach der allgemeinen Fraunhoferschen Näherungsformel

$$I_a = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{p\pi}{\lambda} b \sin \alpha\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} b \sin \alpha\right)} \quad (3)$$

berechnet werden. p bedeutet die Anzahl der parallel beleuchteten Spalte; in unserem Fall ist also $p = 2$ zu setzen. b ist der Abstand zwischen zwei gleichwertigen Stellen der beiden Spalte. Für den Fall, daß als Objekt ein Gitter verwendet wird, entspricht b also der Gitterkonstanten. Der erste Faktor in (3) gibt die Intensität wieder, die in der Brennebene der Linse (auch „Raumfrequenzebene“ genannt) bei Beleuchtung nur eines Spaltes entstehen würde. Der zweite Faktor berücksichtigt dagegen den Einfluß des zweiten Spaltes auf die Intensitätsmaxima des einzelnen Spaltes. Aus der genauen Analyse des zweiten Faktors (vgl. auch z.B. /55,58/) geht also hervor, daß durch das Zusammenwirken mehrerer Spalte an den Stellen der Beugungsordnungen Intensitätsminima (dunkle Stellen) entstehen, deren Abstand sich nach folgender Gleichung berechnen läßt:

$$\sin \alpha_{k'} = \frac{2k' + 1}{2} \cdot \frac{\lambda}{b} \quad (k' = 0, 1, \dots). \quad (4)$$

Dieser Einfluß der gleichzeitigen Beleuchtung von zwei Spalten ist auch beim Vergleich der Information der beiden senkrechten Linien des Buchstaben H mit der Information der waagrechten Linie im RFS in Bild 2 zu erkennen. Mit wachsender Spaltzahl werden die Beugungsnebenmaxima allgemein intensiver und flächenmäßig kleiner¹⁾. Dieses Verhalten wurde (im Prinzip) in 6.1.1 zur Erkennung von Fehlern in Photomasken verwendet.

Die Darstellung von zweidimensionalen Objektinformationen durch Raumfrequenzen hat große Ähnlichkeit auch mit der in

¹⁾ Bei Beleuchtung kreisförmiger Öffnungen entstehen in der Raumfrequenzebene äquivalente Lichtverteilungen.

der elektronischen Nachrichtentechnik mit großem Erfolg praktizierten Methode der "Fourieranalyse" eindimensionaler Informationsfunktionen. In Analogie dazu wird deshalb das RFS auch "Fourierspektrum" genannt. Die charakteristischste Eigenschaft des RFS.s ist seine örtliche Invarianz gegenüber Objektverschiebungen. Phänomenologisch betrachtet beruht diese Eigenschaft darauf, daß sich die Winkel des gebeugten Lichtes, die für die Bildung des RFS.s maßgebend sind, bei Verschiebung des Objektes nicht ändern. Dies ist auch der Grund dafür, daß die Informationen der beiden senkrechten Linien des Buchstabens H im RFS (Bild 2) symmetrisch um den zentralen Lichtpunkt des ungebeugten Lichtes auf einer Gerade liegen. Durch derartige Objekttransformationen, die die Grundvoraussetzung kohärentoptischer Filterverfahren darstellen, entfallen deshalb kompliziertere und aufwendige Justierarbeiten, die sonst, z.B. beim Vergleich von Objekten direkt in der Objektebene notwendig wären. Die Verwendung von Beleuchtungslichtwellen mit großen Kohärenzlängen hat im Gegensatz zu den gewöhnlichen Lichtquellen für praktische Anwendungen den zusätzlichen und sehr wichtigen Vorteil, daß das in der Raumfrequenzebene betrachtete Interferenzfeld über größere Abstände (zwischen Objekt- und Betrachtungsebene) stationär ist. Diese Eigenschaft ist sowohl bei den holographischen (vgl. 3.2.2) als auch bei den Amplitudenfilterverfahren eine weitere für den praktischen Einsatz solcher Verfahren grundlegende Voraussetzung. Aufgrund dieser Eigenschaft können deshalb mit Hilfe geeigneter Blenden bestimmte Beugungsmaxima, d.h. definierte Objektinformationen leicht unterdrückt werden. In der Bildebene 6 (Bild 1) entsteht dann das gefilterte Objekt. Als Beispiel eines derartigen Filtervorganges zeigt Bild 3b) zwei Aufnahmen der Buchstaben H und O, wie sie jeweils nach Unterdrückung des Beugungshauptmaximums (zentraler Lichtpunkt) der RFS.n in der Bildebene photographiert wurden. Bei Unterdrückung des Beugungshauptmaximums in der Raumfrequenzebene werden also

in der Bildebene nur die Kanten der Buchstaben rekonstruiert, weil die Kanteninformation (wegen der durch die an ihnen bewirkten Lichtbeugung) in höheren Beugungsmaxima enthalten ist, die ungehindert die Abbildungslinse und damit auch die Bildebene erreichen. Ein weiteres spezielles Verfahren durch Amplitudenfilterung ist das in 6.1.1. beschriebene Beispiel der Erkennung von Fehlstellen in Photomasken.

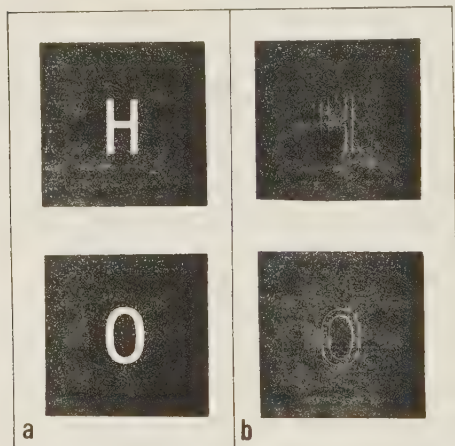


Bild 3.

Aufnahmen der Buchstaben H und O; a) ohne und b) bei Unterdrückung der nullten Beugungsordnung

Außer den bekannten Abbeschen Versuchen /54/ sind erwähnenswert die ebenfalls mit gewöhnlichen Lichtquellen durchgeführten klassischen Experimente von Zernicke /60/, der durch Eingriffe in das RFS (mit Phasenringen) die Sichtbarmachung von Phasenobjekten ermöglicht hat, sowie die Versuche von Maréchal et al. /61/, die zur Unterdrückung von Objektrasterstrukturen Amplitudenfilter verwendeten. Ein wesentlicher Fortschritt wurde jedoch erzielt, als Van der Lugt /62/ 1964 das nach ihm benannte holographische Verfahren vorgeschlagen hat, das prinzipielle Vorteile zur Filterung auch komplizierterer Objektfunktionen besitzt; vgl. auch 3.2.2.

Wegen der festen und eindeutigen Winkelbeziehung der Detailinformationen der Zeichen (z.B. waagrechte oder senkrechte

Linie(n) des Buchstabens H) zu den dazugehörigen Richtungen der RFS.n einerseits und aufgrund der Eigenschaft der Spiegelsymmetrie der RFS.n andererseits können außerdem, wie in /63-65/ gezeigt wurde, durch geeignete optoelektronische Abtastung der RFS.n (z.B. mit rotierenden Lochblenden oder Photodetektoren) Kriterien über die geometrische Form von einfachen zweidimensionalen Objektstrukturen auf relativ einfache Weise gewonnen werden. Für die Identifizierung sämtlicher alphanumerischer Zeichen ist jedoch dieses Verfahren in dieser Form unzureichend, weil die RFS.n vieler Zeichen, wie z.B. E, F, L und 5, 3 usw., bis auf geringe Einzelheiten sehr ähnlich sind. Es ist weiterhin völlig unbrauchbar für die Erkennung der Zeichen der OCR-A Normschrift (vgl. 6.2.2), weil diese Zeichen hauptsächlich aus Linienkombinationen mit nur drei Richtungen zusammengesetzt sind. Um dieses Problem zu umgehen, wurde deshalb dieses Verfahren von Holzinger etc. /66/ durch eine zusätzliche Winkelkodierung erweitert und zur Erkennung von solchen Zeichen verwendet, die mit Hilfe eines Laserstrahles auf Halbleiterscheibchen eingraviert waren.

Sämtliche bisher diskutierte Eigenschaften, die, wie wir gesehen haben, für die Praxis von großer Bedeutung sind, haben nach der Erfindung des Lasers als kohärente Lichtquelle dazu geführt, daß die Anzahl der praktischen Fälle optischer Informationsverarbeitung sehr rasch anwuchs. Allgemein betrachtet führte also diese Erhöhung dazu, daß die wechselseitige Beziehung zwischen elektronischer und optischer Nachrichtenverarbeitung enger und enger wurde. Inwieweit jedoch derartige kohärentoptische Verfahren zur Erkennung von Fehlern in Photomasken, zur Identifizierung und Klassifizierung von Fingerabdrücken sowie zur automatischen Erkennung alphanumerischer Zeichen geeignet sind, wird deutlich bei der Diskussion 1) der damit zusammenhängenden Probleme, 2) der praktischen Forderungen und 3) von Meßergebnissen, die in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit diskutiert werden.

3.2. Theoretische Grundlagen

Nach den phänomenologischen Betrachtungen der kohärent-optischen Zeichenerkennungsmethoden werden hier - soweit es für das Verständnis erforderlich ist - die dazugehörigen physikalischen Vorgänge in allgemeiner und zusammengefaßter Form auch rein wellenoptisch betrachtet und die theoretischen Zusammenhänge bei der holographischen Filterung berücksichtigt. Eine detailliertere Beschreibung darüber findet man in /14-18/.

3.2.1. Kohärentoptische Amplitudenfilterung

Die Amplitude einer zweidimensionalen Lichtverteilung zwischen der Objektebene und der Ebene einer dünnen Transformationslinse (Bild 1) läßt sich vereinfacht mit Hilfe der Fresnel-Kirchhoffschen Gleichung beschreiben. Für den Fall, daß der zu berücksichtigende Objektbereich von der gleichen Größenordnung ist wie die Entfernung l zwischen Objekt und Betrachtungsebene $f(y,z)$ /16,59/, hat diese Gleichung folgende Form:

$$f(y,z) = \frac{1}{j\lambda} \iint_T F(\eta, \xi) \frac{e^{jkr}}{r} d\eta d\xi. \quad (5)$$

$F(\eta, \xi)$ ist die komplexe Amplitudenverteilung im Inneren der Öffnung T in der Objektebene, r die Entfernung eines Punktes der betrachteten Ebene $f(y,z)$ von einem Punkt der Objektebene $(F(\eta, \xi))$, j die imaginäre Einheit und $k = 2\pi/\lambda$ die Wellenzahl des Lichtes. Ist dagegen die Öffnung T im Vergleich zur l klein - ein Fall, der in der Praxis durchaus vorkommen kann - dann wird die Amplitude in einem Punkt der Ebene $f(y,z)$ durch folgenden Ausdruck beschrieben, der nach einer Reihenentwicklung aus (5) entsteht:

$$f(y,z) = \frac{e^{jkl}}{j\lambda l} \iint F(\eta, \xi) e^{j\frac{k}{2l}(y-\eta)^2 + (z-\xi)^2} d\eta d\xi. \quad (6)$$

Bei der Ableitung dieser Beziehung wurde der Einfachheit halber weiterhin angenommen, daß $F(\eta, \xi)$ außerhalb der Öffnung T verschwindet.

Infolge des Durchgangs der Lichtverteilung $f(y, z)$ durch die Sammellinse, die an der optischen Achse die Dicke D_0 und sonst die variable Dicke D hat, ändert sie - wegen der Phasenverschiebung, die durch die unterschiedliche Linsendicke hervorgerufen wird - ihre Form nach der folgenden Näherungsformel (7), die durch Multiplikation mit der Übertragungsfunktion der Linse entsteht:

$$f_1(y_1, z_1) = f(y, z) \cdot e^{jkD_0} \cdot e^{jk(n-1)D} \quad (7)$$

n ist der Brechungsindex des Linsenmaterials.

Die exakte Beschreibung der Lichtverhältnisse, die hinter der Linse herrschen, ist im allgemeinen relativ kompliziert. Sie hängen von den Linsenparametern und von der genauen Lage der Objektpunkte ab, die meist einzeln betrachtet werden. Relativ einfach ist dagegen die Beschreibung, wenn die auffallende Welle als eben angenommen werden kann und wenn dafür klassische Methoden /58/ angewandt werden. Dieser Fall ist jedoch nur theoretisch interessant, weil die Beleuchtungswellen im Realfall eine Gaußsche Verteilung mit kugelförmiger Phasenfront besitzen.

Wichtig ist außerdem die Kenntnis der Lichterregung $f_2(y_2, z_2)$ in der Brennebene der Transformationslinse (d.h. in der Raumfrequenzebene) und zwar - in Anlehnung an den Realfall - wenn das Objekt sich in der Entfernung d von der Linse befindet. Mit $F(\eta, \xi)$ als Amplitude der Lichtverteilung, die direkt hinter dem Objekt herrscht (d.i. also die Objektinformation selbst) und $f(y, z)$ als die Amplitude im Raum zwischen Objekt und Linse, läßt sich die Lichterregung $f_2(y_2, z_2)$ in der Raumfrequenzebene näherungsweise durch (8) darstellen:

$$f_2(y_2, z_2) = \frac{e^{j\frac{k}{2f}(1-\frac{d}{f})(y_2^2 + z_2^2)}}{j \lambda f} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\eta, \xi) e^{-j\frac{k}{f}(y_2 \eta + z_2 \xi)} d\eta \cdot d\xi. \quad (8)$$

f bedeutet hier die Brennweite der Linse. Bei der Ableitung dieser Gleichung wurde weiterhin angenommen, daß das Objekt kleiner als die Linse ist, und daß die endlichen Dimensionen der Linse vernachlässigbar sind.

Aus dem Zähler von (8) folgt, daß für $d = f$, d.h. beim Befinden des Objektes im vorderen Brennpunkt der Linse, die Amplitude der Lichtverteilung $f_2(y_2, z_2)$ genau die Transformierte der Objektfunktion $F(\eta, \xi)$ ist.

Da aber in der Detektorebene nicht die Phase, sondern nur die Lichtintensität registriert und ausgewertet wird, werden in der Praxis (ohne Nachteile) meistens kleinere Abstände gewählt als die Brennweite. Dadurch wird erreicht, daß von der Linse auch stärker gebeugte Lichtbündel, d.h. auch höhere Raumfrequenzkomponenten, erfaßt werden, die wesentliche Informationen über feine Objektstrukturen enthalten.

Bei ungünstigen Abständen kann also die Linse Filtereigenschaften besitzen, weil die Objektinformation in der Bildebene nur unvollständig abgebildet werden kann.

Weitere Ursachen, die zur Verminderung der Bildqualität beitragen, sind Absorptionen, Reflexionen, Aberrationen und sonstige Verlustquellen der optischen Abbildungssysteme.

Bezeichnet man nach /56, S.19/ mit $O(w)$ die komplexe Funktion, die die Objektstruktur beschreibt, und in Analogie dazu mit $D(w)$ die Funktion, die die Einflüsse des optischen Systems berücksichtigt, dann läßt sich die Amplitude $B(w)$ der Lichtverteilung, die in der Bildebene herrscht, aus folgender Gleichung berechnen:

$$B(w) = D(w) \cdot O(w). \quad (9)$$

$w = (u,v)$ stellt einen Vektor mit den Frequenzkomponenten u und v dar. Im Gegensatz zu diesen nur störend wirkenden Filterungsvorgängen, die systembedingt sind und meistens mit entsprechendem Aufwand stark reduziert werden können, besteht, wie wir in Abschnitt 1.3.1 gesehen haben, in vielen Fällen die Möglichkeit, durch einfache und gezielte Eingriffe in die Fouriertransformierten (RFS.n) der Objekte mit geeigneten Filtern bestimmte Objektinformationen zu unterdrücken bzw. hervorzuheben. Der mathematische Ausdruck, der letztere praktisch interessante Filterungsmethode beschreibt, besteht analog zur Gleichung (9) aus dem Produkt der Filterfunktion mit der Fouriertransformierten der Objektinformation, was übertragen auf die Bildebene nun eine Faltung ist. Eine derartige Filterfunktion kann z.B. ein Amplitudenfilter sein. Durch die parallele und punktweise Multiplikation dieser Filterfunktion mit den entsprechenden Komponenten der RFS.n der Objekte, erhält man hinter dem Filter eine Lichtverteilung, aus welcher in der Bildebene der anschließenden Linse (Bild 1) das gefilterte Objektbild rekonstruiert werden kann. In beiden Fällen handelt es sich also um die Methode der sogenannten „Amplitudenfilterung“!

Für bestimmte praktische Anwendungen, wie z.B. bei der Filterung komplizierterer zweidimensionaler Objektfunktionen (mit ebenfalls komplizierten RFS.n) sind jedoch Filter erforderlich, die sowohl die Amplituden als auch die Phaseninformation enthalten. Als Filter mit derartigen Eigenschaften kommen nur Hologramme in Frage, die im folgenden Abschnitt 3.2.2 behandelt werden.

3.2.2. Holographische (angepaßte) Filterung

Bei der holographischen Filterung gelten bis zur Stelle der Raumfrequenzebene die gleichen Beziehungen, die im letzten Abschnitt diskutiert wurden, weil die Objektinformation auch hier Fourier-transformiert werden muß. Wir werden uns deshalb hier nur auf eine kurze theoretische Beschreibung der physikalischen Vorgänge beschränken, die sich auf die Filterherstellung und auf den holographischen Filterprozeß durch Autokorrelation beziehen. Das Speichern der Objektinformation 6 nach (Intensitäts-) Betrag und Phase geschieht, wie in Bild 4 schematisch dargestellt ist, in Form eines Hologrammes in der Raumfrequenzebene 8.

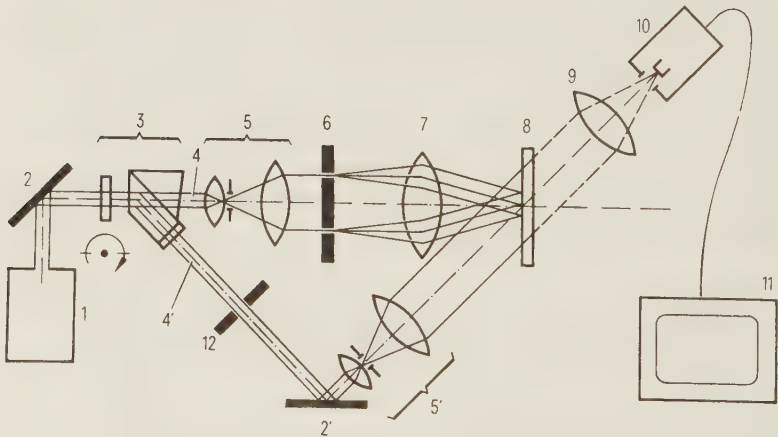


Bild 4. Schematische Darstellung eines der verwendeten experimentellen Aufbauten zur holographischen Zeichenerkennung. 1 Laser, 2 u. 2' Umlenkspiegel, 3 Strahlteiler, 4 u.4' Objekt- bzw. Referenzwelle, 5 u. 5' Aufweitungssysteme, 6 Objektebene, 7 Transformationslinse, 8 Filterebene, 9 Sammellinse, 10 Fernsehkamera (Signalebene), 11 Fernsehschirm, 12 Lichtsperrre für die Referenzwelle (nur während des Korrelationsprozesses)

Die nach dem holographischen Prinzip zur Hologrammherstellung erforderliche sogenannte Referenzwelle wird vom gleichen Laser 1 abgeleitet. Sie wird anschließend mit einem Spiegel 2' unter einem möglichst kleinen Winkel in die Richtung des RFS.s umgelenkt und mit einem Linsensystem (Teleskop 5') aufgeweitert und parallel gemacht. Die Lochblende in der Brennebene der ersten Linse des Aufweitungssystems ist so dimensioniert, daß nur das zentrale Lichtmaximum die Lichtsperrre passieren kann. Sie wirkt also als Filter zur Unterdrückung des gebeugten und störend wirkenden Lichtes. Mit der durch die Überlagerung des RFS.s mit der Referenzwelle entstandenen Lichtverteilung wird eine Photoplatte belichtet, die nach ihrer Entwicklung ein Hologramm darstellt.

Werden nun das RFS des Objektes durch die Funktion $f_2(y_2, z_2)$ und die komplexe Amplitude der Referenzwelle durch den Ausdruck $a(y, z) = a_0 e^{jk\theta z}$ dargestellt /16/, dann ist die von der Photoplatte registrierte Intensität

$$E = a_0^2 + |f_2|^2 + a_0 f_2(y_2, z_2) e^{-jk\theta z} + a_0^* f_2^*(y_2, z_2) e^{jk\theta z}. \quad (10)$$

θ ist der Winkel zwischen RFS und Referenzwelle und f_2^* die konjugierte Fouriertransformierte der Objektfunktion $F(\eta, \xi)$. Die Amplitudetransmission t_N hinter der entwickelten Photoplatte wird bei linearer Aufzeichnung durch folgenden Ausdruck wiedergegeben:

$$t_N = t_0 - \beta (a_0 f_2^*(y_2, z_2) e^{jk\theta z} + |f_2|^2 + a_0 f_2(y_2, z_2) \cdot e^{-jk\theta z}). \quad (11)$$

Der zweite der vier Terme ¹⁾ dieser Gleichung enthält bei senkrechter Beleuchtung mit einer ebenen Welle die vom Hologramm durchgelassene Amplitude, die der konjugierten Fouriertransformierten der Objektfunktion entspricht und die Richtung der Referenzwelle hat. Nach der informationstheoretischen Definition /67/ stellt also ein solches Hologramm ein sog. „angepaßtes“ Filter

¹⁾ Die übrigen drei Terme beschreiben Lichtfelder, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden, weil sie für die holographische Filterung bedeutungslos sind; $\beta = \beta T$ (β Steigung, T Belichtungszeit)

mit dem besten Optimierungsgrad des Signal-Rausch-Verhältnisses dar. Das holographische Filterverfahren wird deshalb in Analogie zu der elektronischen Definition „holographische angepaßte Filterung“ genannt.

Eine Antwort auf die Frage, ob ein Objektfeld $F(\eta, \xi)$ eine im Hologramm gespeicherte Objektinformation $G(\eta, \xi)$ enthält oder nicht, kann man nun durch Beleuchtung des Filterhologramms mit der Fouriertransformierten $f_2(y_2, z_2)$ des Objektfeldes erhalten. Denn bei einer derartigen Filteransteuerung entsteht nach (11) hinter dem Filter eine Lichtverteilung, die das Erkennungssignal enthält. Diese Lichtverteilung und das Erkennungssignal ergeben sich aus der Multiplikation von t_N mit der Fouriertransformierten $f_2(y_2, z_2)$. Man erhält:

$$t_N f_2(y_2, z_2) = t_0 f_2 - \beta' \left\{ a_0 f_2 g^* e^{jk_0 z} + f_2 |g|^2 + a_0 f_2 g e^{-jk_0 z} \right\}. \quad (12)$$

In Analogie zu f_2 und f_2^* bedeuten g bzw. g^* die Fouriertransformierten der Vergleichsfunktion $G(\eta, \xi)$.

Der zweite Term dieser Gleichung liefert, wie wir im folgenden sehen werden, das Erkennungssignal. Denn unter der Annahme, daß $F(\eta, \xi) = G(\eta, \xi)$ (d.h. $f_2 = g$) ist, wird auch $f_2 g^* = g g^*$. Dies bedeutet also, daß in der Richtung der Referenzwelle, und zwar in der Brennebene der letzten Linse des Systems, als Antwortfunktion ein intensitätsstarker Lichtpunkt, das Erkennungssignal, rekonstruiert wird.

Stimmt dagegen die Vergleichsfunktion mit der gespeicherten teilweise oder überhaupt nicht überein ($F(\eta, \xi) \neq G(\eta, \xi)$), dann bekommt man als Antwortfunktion ein Lichtsignal, das intensitätsmäßig schwächer und flächenmäßig größer ist. Im Fall der Übereinstimmung spricht man deshalb vom „Autokorrelationssignal“ und sonst vom „Kreuzkorrelationssignal“.

Die Herstellung und Verwendung derartiger Filter wurde zum ersten Mal von Vander-Lugt ca. vier Jahre nach der praktischen Realisierung des ersten optischen Lasers (1960 durch Maiman /12/) ausgeführt. Das holographische Verfahren in seiner heutigen Form hat dagegen D. Gabor /13/ bereits im Jahre 1948 vorgeschlagen.

4. Experimentelle Aufbauten sowie Entwicklung spezieller Vielkanalkorrelationssysteme und weiterer Systemkomponenten

Da die zur Erkennung von Fehlern in Photomasken und die zur Durchführung von ersten prinzipiellen Experimenten mit holographischer Filterung verwendeten Versuchsaufbauten mit den Anordnungen der Bilder 1 u. 4 weitgehend identisch sind, werden hier anhand dieser Bilder zunächst nur die dazugehörigen technischen Daten der einzelnen Komponenten angegeben. Das Hauptgewicht wird anschließend auf die Beschreibung bekannter und vor allem auf die Entwicklung, Erprobung und Diskussion eigener Vielkanalkorrelationsmethoden gelegt. Die Vielkanalkorrelationssysteme lassen sich zum größten Teil in zwei Hauptgruppen unterteilen: In die erste Gruppe sind Systeme einzuordnen, die eine parallele Ansteuerung sämtlicher Filter voraussetzen. In die zweite Gruppe gehören dagegen Systeme, bei denen die Filter sequentiell angesteuert werden. Unter Berücksichtigung der gleichen Kriterien können schließlich Systeme, bei denen die Filteransteuerung quasi-parallel erfolgt, einer dritten Kategorie zugeordnet werden. Ein solches System, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, wird in 4.3.7 beschrieben. Je nach Verfahren werden die Filterhologramme der Vielkanalsysteme auf der Photoplatte im allgemeinen entweder einzeln, d.h. örtlich getrennt, oder - unter Ausnützung der relativ hohen Speicherkapazität der photographischen Schicht - durch Überlagerung einer größeren Anzahl an der gleichen Stelle untergebracht.

4.1. Beschreibung der Systemkomponenten zur Amplituden- und einfachen holographischen Filterung

Als kohärente Lichtquelle verwendeten wir einen He-Ne-Laser (Modell LG 641 der Firma Siemens) mit einer Ausgangsleistung von ca. 10 mW. Seine Wellenlänge beträgt bekanntlich 633 nm. Um eine bessere Ausnützung der Experimentierfläche zu ermöglichen, wurde der Lichtstrahl, der beim Verlassen des Laserresonators einen Durchmesser von ca. 2 mm hat, mit einem Spiegel (Bild 4) meistens um 90° in die Längsrichtung eines Granittisches (s.S.30) umgelenkt und anschließend mit Hilfe eines stufenlos regelbaren Strahlteilers /68/ in zwei Strahlbündel geteilt.

Die Aufteilung und die stufenlose Änderung des Intensitätsverhältnisses zwischen beiden Strahlen, - sie werden in der holographischen Zeichenerkennung Objekt- bzw. Referenzwelle genannt /69/ -, ist nicht nur für das holographische Verfahren notwendig, sondern auch bei der Amplitudenfilterung vorteilhaft, weil, wie wir in 5.1.1 sehen werden, durch die stufenlose Änderung der Lichtintensität eine bequeme qualitative Beurteilung des gefilterten Objektfeldes z.B. mit Hilfe eines Fernsehschirmes möglich wird. Als Strahlteiler dienten ein Foster-Prisma und zwei $\lambda/2$ -Plättchen /68/. Durch die Rotation des ersten Plättchens wurde die stufenlose Veränderung des Intensitätsverhältnisses zwischen Objekt- und Referenzwelle erreicht. Das zweite Plättchen, das auf das Foster-Prisma aufgekittet war, diente lediglich zur Gleichstellung der Polarisationsrichtung beider Strahlen, wie es in der Holographie bei nicht depolarisierenden Objekten erforderlich ist. Nach der erneuten Umlenkung der Referenzwelle mit einem weiteren Spiegel in der Richtung der Raumfrequenzebene (Filterebene) wurden beide Strahlen mit zwei geeignet gewählten Teleskopsystemen aufgeweitet. Dadurch konnten mit der Objekt- und Referenzwelle (die eine gaußförmige Intensitätsverteilung besitzen) die Flächen der zur gleichzeitigen Beleuchtung in Frage kommenden Objektfelder

und des für die Filterherstellung verwendeten Photoplatten-Ausschnitts ausreichend beleuchtet werden. Die Daten (Brennweiten, Aperturen, Linsenabstände) beider Aufweitungssysteme, die aus vorhandenen Linsen zusammengesetzt waren, wurden für die Durchführung des größten Teils der Versuche so gewählt, daß der Durchmesser beider mit dem System parallel gestellten Strahlen ca. 8 cm betrug. Teilweise verwendeten wir auch die drei Aufweitungssysteme der Fa. Tropel (Modell 280); sie sind so dimensioniert, daß der Strahldurchmesser 2,5 cm, 5 cm oder 10 cm beträgt. Mit der so vorbereiteten Objektwelle wird nun das in der Objektebene in transparenter Form (vgl. auch 5.2.3) vorliegende Objekt oder Objektfeld beleuchtet. Zur Beleuchtung einzelner Objekte eines Zeichenfeldes, wie es z.B. bei der Filterherstellung erforderlich ist, diente eine Blende mit variabler Öffnung. Nach Verlassen der Objektebene gelangt der Lichtstrahl (der mit der Objektfunktion moduliert ist) über die Sammellinse in deren hintere Brennebene, wo die Fouriertransformierte (RFS) der Objektinformation entsteht. Als Transformationslinsen diente teilweise das Linsensystem Tele-Xenar (1:5,5/500, Schneider/Kreuznach) und sonst eine von der Firma Halle (Berlin) angefertigte Linse (Brennweite 50 cm, Apertur 10 cm). In beiden Fällen handelt es sich um korrigierte Linsen oder Linsensysteme.

Um viele Beugungsmaxima optimal durch die Linse zu leiten und um unerwünschte Filterwirkungen der Linse zu vermeiden, wählten wir den Abstand zwischen Objektebene und Linse meistens kleiner als die Brennweite; vgl. 3.2.1. In der hinteren Brennebene der Linse (am Entstehungsort des RFS.s) kann nun, wie wir im Abschnitt 3.1 u. 3.2.2 gesehen haben, die Lichtverteilung bestimmter Beugungsordnungen sowohl mit Amplituden- als auch mit Hologrammfiltern gezielt beeinflusst werden. Für den Spezialfall der Erkennung von Fehlern an Photomasken (6.1.1) diente als Filter eine photographische Aufnahme des RFS.s einer fehlerfreien Maske, die die gleiche Sollstruktur hatte wie die Prüfmasken. Die Photoplatten wurden mit Hilfe entweder einer

Spezialküvette /68/ oder einer Spezialglasplattenhalterung nur an Ort und Stelle (in situ) entwickelt. Dadurch wurden aufwendige Arbeiten vermieden, die für die exakt genaue Justierung der Filterplatte in der Sollage erforderlich wären. Eine exakte Justierung mit tragbarem Aufwand ist insbesondere deshalb sehr schwer, weil die Lichtpunktverteilungen der RFS.n (vor allem die der Photomasken) im allgemeinen sehr dicht und sehr feinstrukturiert sind. Die Küvette bestand aus zwei parallelen Glasplatten, die mit Hilfe eines Metallrahmens in definiertem Abstand festgehalten wurden. Die verschiedenen Flüssigkeiten zur Behandlung der Photoplatten wurden der Reihe nach mit Leitungen zu- bzw. abgeführt. Vor der Belichtung und nach der Behandlung der Photoplatten wurde die Küvette bei Bedarf mit destilliertem Wasser gefüllt, das zur Schwellung der unbelichteten Photoschicht bzw. als Immersionsflüssigkeit diente.

Wegen der oben genannten Gründe der schweren Filterplattenjustierung erwies sich die nicht mögliche Wiederverwendung der Filter nach ihrer Entfernung aus der Küvette als nachteilig. Für die holographischen Filterungsversuche verwendeten wir deshalb größtenteils eine spezielle Filterhalterung, die ein schnelles und präzises Auswechseln der Filter ohne Nachjustierung ermöglichte. Diese Halterung ist in Bild 5 schematisch dargestellt. Sie besteht aus zwei Aluminiumteilen, die in Bild 5 mit A bzw. B gekennzeichnet sind. Teil B trägt an der vorderen Seite zwei konusförmige Vertiefungen und an der unteren Seite einen Schlitz, in dem die Photoplatte mit zwei Kunststoffschrauben gehalten werden kann. Die so befestigte Photoplatte wird nun in den Teil A, der in der Versuchsanordnung fest montiert ist, hineingeführt und an dieser Stelle mit zwei konusförmigen Vertiefungen exakt angepaßten und genau geführten Stiften (aus gehärtetem und rostfreiem Stahl) durch Federkraft so festgehalten, daß die Platte leicht sowohl entfernt als auch (bei Bedarf) von neuem an die gleiche Stelle gebracht werden kann. Die eine Öffnung im Teil A ist in der einen Richtung breiter als der Durchmesser des Stiftes, damit

dieser sich im Bedarfsfall selbständig (durch die Anpassung der Führung und durch die Federkraft) so verschieben kann, daß Maßabweichungen zwischen den Abständen der konusförmigen Vertiefungen des Teils B, der mehrmals benötigt wird, ausgeglichen werden.

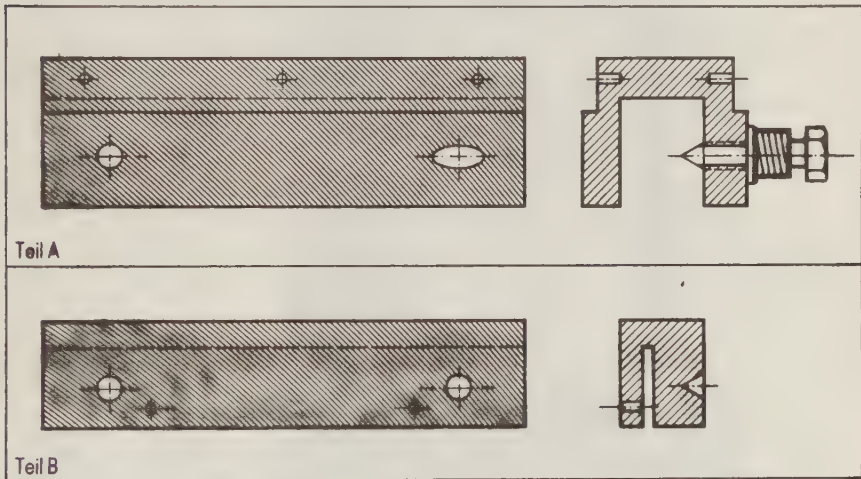


Bild 5. Schematische Darstellung der speziellen Filterhalterung

Die Einstellunsicherheit dieser Vorrichtung war kleiner als die der von uns verwendeten Meßapparatur (ca. 1 o/oo), denn nach mehrmaligem Entfernen und Wiedereinsetzen der Filterplatte im Korrelator konnte keine Änderung der Signalintensität gegenüber dem Autokorrelationssignal bei in „Situ“-Verarbeitung festgestellt werden. Statt des verwendeten Aluminiums, das relativ weich ist, wäre bei größeren Anforderungen für sämtliche Teile ein härteres Material vorzuziehen. Bild 6 zeigt diese Photoplattenhalterung in einer Spezialanfertigung einer dazugehörigen Photokassette.

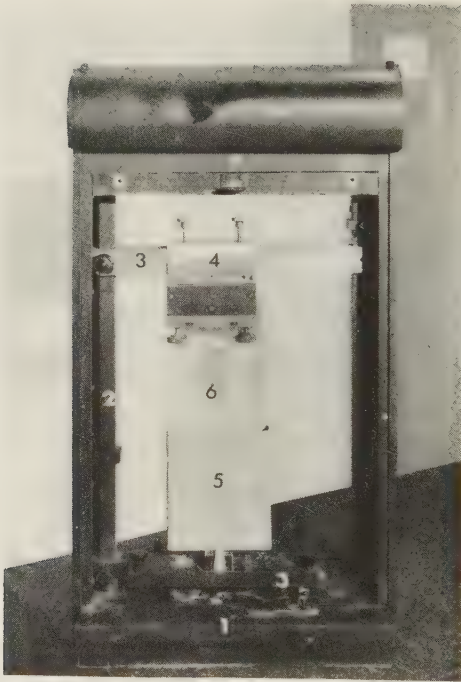


Bild 6. Photokassette mit Filterhalterung (nur die Rückseite erkennbar) von Bild 5.
1 Gehäuse, 2 bzw. 2' Achsen, 3 bzw. 3' schwenkbare Arme, 4 Glasplattenhalterung, 5 Flüssigkeitsbehälter, 6 photographische Platte, 7 beidseitige Verdunkelfenster

Der Teil A (und damit auch die Photoplatte) wurden an dem waagrechten Arm 3 der Kassette so weit über der Oberfläche des Experimentiertisches (s.S. 30) befestigt, daß die Flüssigkeitsbehälter 5 (mit den Chemikalien und dem Wasser) - zwecks einer zusätzlichen photochemischen Verarbeitung an Ort und Stelle - an die Photoplatte herangeführt werden konnten.

Während der Vorbereitungszeit (vor der Aufnahme) jedes einzelnen Filters (im Vielkanalkorrelationsfall) und während der Entwicklung der Photoplatten wurde der innere Raum der Kassette im allgemeinen durch lichtdichte und nach oben verstellbare Rollos 7 verdunkelt.

Tabelle 1 enthält die Zeitdauer der verschiedenen Verfahrensschritte der photochemischen Behandlung der belichteten Photoschicht der verwendeten Agfa Scientia 10 E 75 Photoplatten und die Bezeichnung der Chemikalien.

Tabelle 1: Bearbeitungszeiten und verwendete Chemikalien

	Entwickeln	Wässern	Fixieren bzw. Bleichen		Wässern
Zeit min.	5	10	4	4	15
Chemikalien	G 3 p (Fa. Agfa)	Dest. Wasser	Fixiersalz (Tetenal)	Kaliumbichromat	Dest. Wasser

Fixiert wurden die Photoplatten nur zur Erzeugung der Amplitudenfilter bei der Erkennung von Fehlern in Photomasken (vgl. 6.1.1). Bei der holographischen Zeichenerkennung wurden sie gebleicht, weil dadurch die Photoschicht je nach Belichtungsenergie eine örtlich unterschiedliche Änderung ihrer Schichtdicke und ihres Brechungsindex erfährt. Beide Effekte führen zu einem höheren Beugungswirkungsgrad (d.h. zu einer höheren Signalintensität).

Der theoretische Wert des Beugungswirkungsgrades derartiger Filter, die im Gegensatz zu den Amplitudenfiltern auch „Phasfilter“ genannt werden, beträgt ca. 33%. Bei Amplitudenfiltern kann er dagegen die theoretische Grenze von ca. 6% nicht überschreiten /69, S. 191-196/. Zur schnelleren Trocknung der Photoplatten und zur wirkungsvolleren Vermeidung von Gelatineschrumpfungen /70/ tauchten wir die Photoplatten nach der

letzten Wässerung oft jeweils ca. eine Minute zuerst in 50%ige und anschließend in 90%ige Alkohol-Wasser-Mischungen ein. Ein ähnliches Verfahren zur Kompensation der Schrumpfungen durch Schwellung wird in /71/ beschrieben.

Als Linse zur Abbildung der mit den Amplitudenfiltern gefilterten Objektinformationen (Photomasken) benutzten wir größtenteils den Typ Heliar (1:4,5/24 cm) der Fa. Voigtländer. Zur Fokussierung der holographisch rekonstruierten Erkennungssignale, die in der Richtung der Referenzwelle entstehen (Bild 4), diente dagegen eine in der betriebseigenen optischen Werkstatt (Siemens) hergestellte Sammellinse. Sie besaß eine Brennweite von 5 cm und eine Apertur von 4 cm.

Sämtliche Systemkomponenten wurden wegen der erforderlichen hohen Stabilität entweder mit Hilfe von Gleitschienen (Spindler & Hoyer) und dazu passenden Reitern oder mit Hilfe schwerer Metallklötze, hauptsächlich auf zwei massiven Granittischen der Firma Hahn & Kolb Stuttgart, und Micro-Controle, Paris, befestigt. Beide Tische waren zusätzlich in den Schwingungsknoten auf Gummipuffer gelagert. Ihre Abmessungen betrugen 2 m x 1 m x 0,22 m bzw. 2,2 m x 1,2 m x 0,2 m. Bild 7 zeigt schließlich eine Aufnahme des vollständigen Aufbaues, wie er überwiegend verwendet wurde, auf dem zuerst genannten Tisch.

Die Betrachtungsmethoden der gefilterten Objektbilder und der holographischen Erkennungssignale sowie die für die weitere Verarbeitung und Auswertung verwendeten Verfahren werden gesondert in Abschnitt 5.1 behandelt.

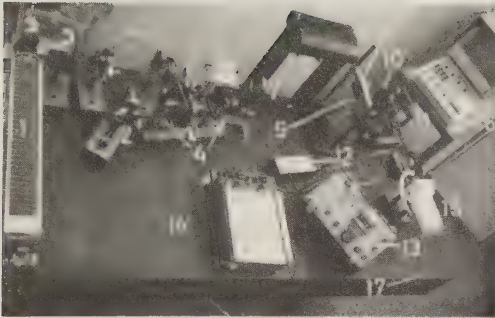


Bild 7. Experimenteller Aufbau zur einfachen und Mehrkanalfilterung mit geringer Ansteuerungsgeschwindigkeit (vgl. auch 6.1.3.1 und Bild 16).
1 Laser, 2 u. 2' Umlenkspiegel, 3 Strahlteiler, 4 u. 4' Aufweitungssysteme, 5 Objekthalterung, 6 Keilvorrichtung (Bild 17), 7 Transformationslinse, 8 Photoplattenhalterung und Photokassette, 9 Filterplatte, 10 Sammellinse, 11 Photodetektor (vgl. 5.1.2), 12 Photonenvervielfacher, 13 Anzeigegerät, 14 Schreiber, 15 Fernsehkamera, 16 Fernsehschirm, 17 Granittisch

4.2. Bekannte Vielkanalkorrelationssysteme

In diesem Abschnitt werden kurz einige interessante Vorschläge beschrieben und diskutiert, die durch die Fachliteratur bekannt wurden. Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch die Zuordnung und Art der Ansteuerung der Filter.

Einer dieser Vorschläge wurde von Burckhard /72/ beschrieben und setzt die lineare Überlagerung mehrerer Filter an der gleichen Stelle der Filterplatte voraus (sog. Superpositionsverfahren). Es handelt sich also um ein System, bei dem sämtliche Filter nur gleichzeitig angesteuert werden können. Die schematische Darstellung des dazugehörigen experimentellen Aufbaues ist in Bild 8 wiedergegeben.

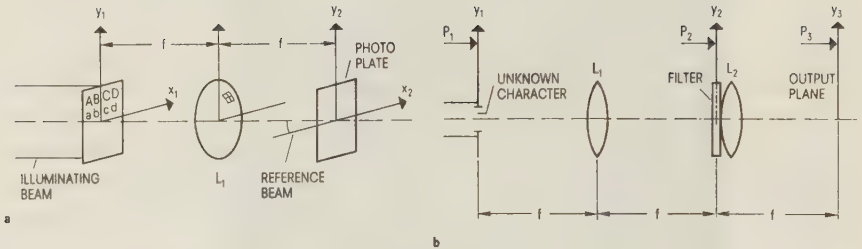


Bild 8. Vielkanalkorrelationssystem nach Burckhard /72/:
a) Experimenteller Aufbau zur Filterherstellung,
b) Experimenteller Aufbau zur Filteransteuerung

Nach diesem Verfahren sind sämtliche Filter, die z.B. zur Erkennung des gesamten Alphabetes erforderlich sind, in der (x_2, y_2) -Ebene (Bild 8a), d.h. in der Umgebung des Brennpunkts der Transformationslinse L_1 , zu überlagern. Als Unterscheidungsmerkmal zwischen den Filtern wird dabei der Einfallswinkel der Referenzwelle auf die Filterebene verwendet. Jedem Zeichen (Buchstaben) wird also bei der Filterherstellung (nach jeder Aufnahme) eine definierte Referenzwellen-Richtung zugeordnet (Winkelkodierung). Bei der parallelen Ansteuerung sämtlicher Filter mit dem RFS z.B. eines zu identifizierenden Zeichens (Bild 8b), entsteht dann nur in derjenigen Referenzwellen-Richtung ein lichtintensives Signal, die der kodierten Richtung des gespeicherten Zeichens entspricht. Etwas kompliziertere, jedoch analoge Signalverhältnisse herrschen auch bei Ansteuerung der Filter mit dem RFS eines Zeichenfeldes. Als Nachteile dieses Verfahrens sind jedoch zu nennen a) die leichte Übersteuerung des linearen Bereiches der Kennlinie des photographischen Materials (vor allem wegen der extrem großen Intensitätsunterschiede zwischen den Komponenten der RFS.n) und b) die ungünstigen Werte, die sowohl die absoluten Signalintensitäten als auch die Signal-Störlicht-Verhältnisse (vgl. 5.3.3, 5.3.4) annehmen. Zu den Störsignalen gehören auch die Kreuzkorrelationssignale

und das Rauschen der Photoschicht. Weitere ähnliche Vorschläge zur linearen Überlagerung mehrerer Filter machten auch D. Gabor /73/, A. Vander-Lugt /74/ u.a.

G. Groh /75/ schlug eine im Prinzip unterschiedliche Anordnung vor, mit deren Hilfe (und im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Verfahren der Superposition) die Filterhologramme in Form einer Matrix örtlich getrennt hergestellt werden können. Die Ansteuerung der Filterhologramme geschieht jedoch auch hier parallel. Zu der dazu erforderlichen Erzeugung einer Vielzahl von RFS.n einer Objektfunktion (allgemein) hat Groh das in /76/ beschriebene Punkthologramm vorgeschlagen (Bild 9).

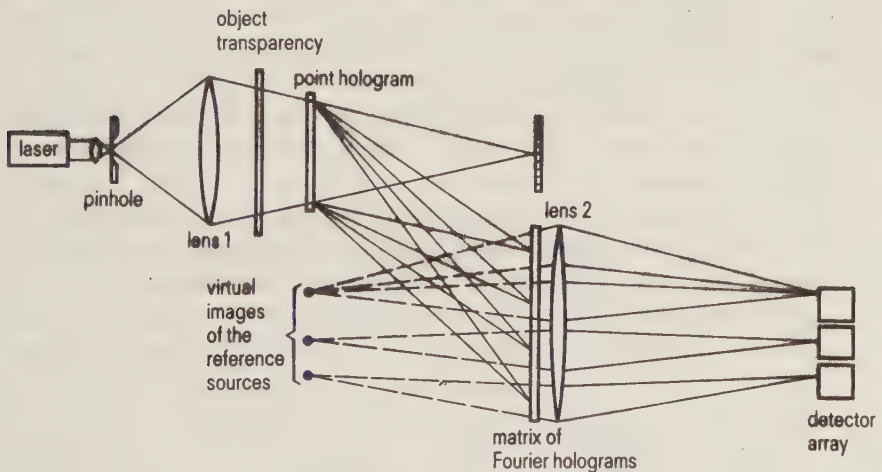


Bild 9. Schematische Darstellung des Vielkanalkorrelations-systems nach Groh /75/

Bei Beleuchtung des Punkthologramms mit der Lichtverteilung der Objektinformation, die zwischen die erste Linse und dem Punkthologramm gestellt wird, entstehen in der Filterebene (das ist die Ebene der Punktbilder des Hologramms) gleichzeitig

eine Anzahl von RFS.n, die der Anzahl der im Hologramm gespeicherten Lichtpunkte entsprechen. Sorgt man nun bei der Filterherstellung mit geeigneten Blenden dafür, daß jeweils nur ein RFS die Filterebene erreicht, dann ist es durch Auswechseln der Zeichen (nach jeder Aufnahme) möglich, mit jeder Punktlichtquelle ein Filter herzustellen. Dadurch, daß die Ansteuerung sämtlicher Filter, z.B. mit dem RFS des zu identifizierenden Zeichens parallel erfolgt, wird mit der zweiten Linse nur derjenige im Punkthologramm gespeicherte Lichtpunkt optimal rekonstruiert, der in der Filterebene dem RFS des gesuchten Zeichens entspricht.

Kock und Rabe /77/ führten mit einer sehr ähnlichen, jedoch wesentlich verbesserten Anordnung, die für eine Kapazität von 49 Filterhologrammen ausgelegt wurde, erste prinzipielle Experimente durch.

Die gleichen Autoren berichten in derselben Arbeit auch über ein sequentielles Vielkanalkorrelationssystem, mit dem sie ebenfalls prinzipielle Versuche durchführten. Dieses System (Bild 10) unterscheidet sich von dem zuletzt beschriebenen Vielkanalkorrelator im wesentlichen durch den Lichtablenker und durch die Faseroptik (Glasfaser), die zur Erzeugung der Lichtpunktbilder (d.h. der RFS.n) in der Filterebene verwendet werden.

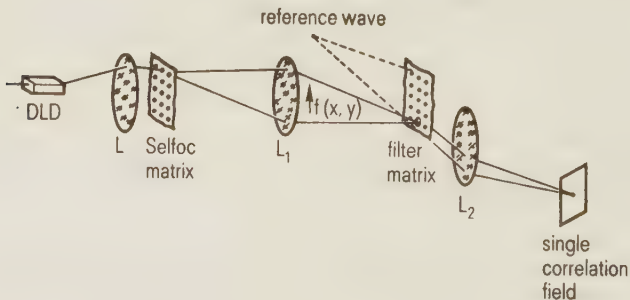


Bild 10. Schematische Darstellung des Vielkanalkorrelations-systems nach Koch und Rabe /77/

Die erste Linse fokussiert den Laserstrahl, der mit Hilfe des Lichtablenkers mit hoher Genauigkeit geführt werden muß, exakt an denjenigen Stellen, an denen sich die Fasern befinden. Die hinter den Fasern sich kugelförmig ausbreitenden Wellen werden anschließend durch die nächste Linse geleitet, die, ähnlich wie im Fall des Lichtpunkthologrammes, in der Filterebene ein (Punktlichtwellen-) Bild der Fasern rekonstruiert. Befindet sich nun hinter dieser Linse ein Objekt, dann entsteht in der Bild-Punktebene sein RFS.

Jeder Lichtpunktquelle kann also hier ein Filter zugeordnet werden. Als Zeichenerkennungskriterium wird die Intensität der Korrelationssignale verwendet, die jeweils durch die sequentielle Ansteuerung der Filterhologramme in der Signalebene der dritten Linse entsteht.

Weitere Autoren, die für ähnliche holographische Anwendungen äquivalente Verfahren beschrieben haben, sind Leith et. al. /78/ van Ligten und Lawton /79/, La Macchia und White; Aitken und Wang /80/, u.a.

4.3. Entwicklung, Vergleich und teilweise Erprobung eigener Vielkanalkorrelationsmethoden

In der Vielkanalkorrelationstechnik ist man im allgemeinen bestrebt (vgl. 4.1), die in der Praxis erforderliche Filterzahl, die oft sehr groß ist, entweder durch lineare Überlagerung (z.B. bei Wahl einer entsprechend großen Anzahl unterschiedlicher Referenzwellenrichtungen /72/) oder durch örtliche Filtertrennung (und eine einzige Referenzwellenrichtung /75,77/) herzustellen. Eine dritte Möglichkeit besteht darin, beide Methoden zu kombinieren. Wir beschränkten uns von Anfang an auf die beiden zuletzt genannten Methoden, weil sie wegen der Nachteile, die mit der linearen Überlagerung zusammenhängen (vgl. 4.1. sowie /81,82/), uns als günstiger erschienen sind.

4.3.1. Verfahren zur parallelen Filteransteuerung mit Hilfe holographisch erzeugter Objektbeleuchtungswellen

Die Realisierung von vielfachen Beleuchtungswellen mit unterschiedlichen Richtungen versuchten wir zuerst mit Hilfe des von Kiemle /83/ vorgeschlagenen holographischen Verfahrens zu erreichen (Bild 11a).

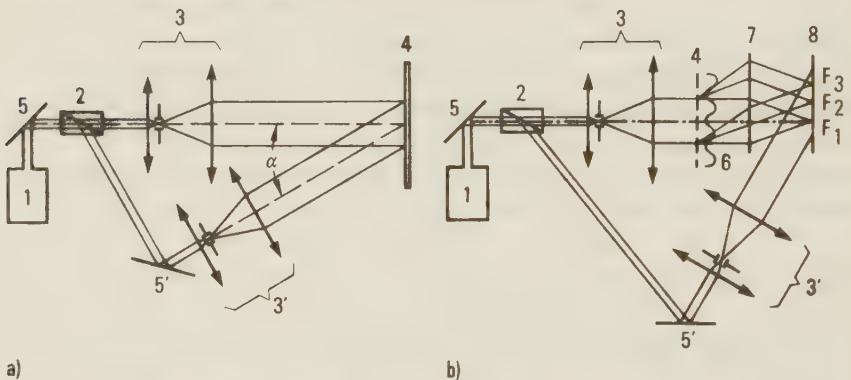


Bild 11. Vielkanalkorrelationssystem mit holographisch erzeugtem Beleuchtungswellenvielfach nach Kiemle /83/; a) Aufbau zur Herstellung des Hologramms, b) Vielkanalkorrelationssystem mit dem Hologramm zur Erzeugung des Beleuchtungswellenvielfaches.
1 Laser, 2 Strahlteiler, 3 und 3' Aufweitungssysteme, 4 und 4' Photoplatte bzw. Hologrammplatte zur Erzeugung des Beleuchtungswellenvielfaches, 5 und 5' Umlenkspiegel, 6 Objekt(ebene), 7 Transformationslinse, 8 Filterebene ($F_1, F_2 \dots F_n$ Filter)

Das Wellenvielfach, das im Gegensatz zu dem Verfahren von Groh /75/ nicht aus kugelförmigen, sondern aus ebenen Wellen bestehen soll, wird durch mehrfache Belichtung einer Photoplatte mit zwei ebenen Lichtwellen hergestellt, deren Winkel nach jeder Aufnahme jeweils um einen bestimmten Wert geändert wird. Beleuchtet man nun ein derartiges Hologramm 4, das sich vor der Zeicheneingabeebene eines holographischen Zeichenerkennungssystems (Bild 11b) befindet, mit einer ebenen Welle, d.h. mit der Referenzwelle des nach Bild 11a hergestellten Hologramms, dann entsteht hinter dem Hologramm (aufgrund des holographischen Prinzips) eine den Winkelwerten α_n

(n: Anzahl der Winkelstellungen) entsprechend große Anzahl von ebenen Wellen mit unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen, die zur Objektbeleuchtung verwendet werden können. Bei n Wellenrichtungen entsteht also in der Brennebene der Transformationslinse eine gleich große Anzahl von RFS.n ($F_1, F_2 \dots F_n$; Bild 11b), die zur Filterherstellung verwendet werden können.

Bei der labormäßigen Herstellung eines derartigen Beleuchtungswellenvielfaches mit tragbarem Aufwand und mit vorerst fünf Wellenrichtungen sind wir jedoch auf Schwierigkeiten gestoßen, die in erster Linie auf die gaußförmige Intensitätsverteilung (über den Querschnitt der verwendeten ebenen Lichtwellen) und auf die damit zusammenhängende leichte Übersteuerung der photographischen Schicht zurückzuführen sind. Die rekonstruierten Lichtwellen enthielten weiterhin die gitterförmige Strukturinformation der Hologramme, die bei der Hologrammaufnahme aufgrund der Interferenz beider Wellen entsteht. Sie führte deshalb zu weiteren Störungen, weil diese Information eine relativ stark ausgeprägte inhomogene Beleuchtung der Zeichen zur Folge hatte.

4.3.2. Einfache Gitter als sequentielle und quasiparallele Beleuchtungswellenerzeuger

Eine örtlich getrennte und relativ einfache Zuordnung der Filterhologramme ist auch dann möglich, wenn vor der Objekteingabeebene eines holographischen Zeichenerkennungssystems (Bild 4) beispielsweise ein gewöhnliches Gitter (Amplituden- oder Phasengitter) angebracht wird. Bei Beleuchtung eines derartigen Gitters mit einer ebenen Lichtwelle verlassen es die Beugungsordnungen, die ebenfalls parallel sind und genauso wie die holographisch rekonstruierten Wellen (vgl. 4.3.1) als unabhängige Kanäle verwendet werden können¹⁾. Wegen der gitterförmigen Struktur der Hologramme handelt es sich also in beiden Fällen um fast ähnliche Verfahren. Der Hauptunterschied liegt darin, daß holographisch (bei entsprechend hohem

¹⁾ Bei Verwendung eines Amplituden-Sinusgitters entstehen nur die +1. und -1. Beugungsordnungen /84/.

Aufwand) eine relativ größere Anzahl von Beleuchtungswellen gleicher Intensität erzeugt werden kann (zumindestens im Prinzip) als allgemein mit gewöhnlichen Gittern zu erwarten ist.

Bei Vielkanalkorrelatoren mit höheren Filterzahlen erfordert deshalb die Verwendung von einfachen (gewöhnlichen) Gittern eine sequentielle Ansteuerung (vgl. 4.3.7) der Filterhologramme, z.B. durch Rotation des Gitters. Im Abschnitt 4.3.3 werden wir außerdem sehen, daß die sequentielle Filteransteuerung in vielen Fällen vorteilhaft ist. Die einfachen Gitter (die in guter Qualität käuflich sind) besitzen andererseits nur in einem geringeren Ausmaß die in 4.3.1 diskutierten Nachteile. In der Zwischenzeit gibt es außerdem auch Gitter, die mit Hilfe der Computer-Technik hergestellt werden und noch bessere Eigenschaften besitzen /85/.

Eine wesentliche Erhöhung der Filterzahl - und damit auch eine bessere Ausnutzung der Speicherkapazität der photographischen Platte - kann weiterhin erreicht werden, wenn statt eines einzelnen Gitters zwei getrennte Gitter (z.B. Liniengitter) verwendet werden, deren Kreuzungspunkte den variablen Winkel ϕ bilden¹⁾ (Bild 12a, b).

Die stufenlose oder schrittweise Änderung des Winkels (d.h. der Moiré-Gitterkonstanten d_2 u. d_3) geschieht durch Rotation entweder beider Gitter mit unterschiedlicher Geschwindigkeit oder eines von ihnen. Die Änderung der Gitterkonstanten hat deshalb zur Folge, daß die RFS.n über eine größere Fläche (als sonst) in der Filterebene verteilt werden können. Je nach Art der Gitterrotation (stufenlos oder schrittweise) können die RFS.n spiralförmig (vgl. Bild 12b) bzw. auf konzentrischen Kreisen wandern. Die Anordnung und Ansteuerung der Filter kann analog erfolgen. Als Nachteil dieses Verfahrens, das aus Zeitgründen labormäßig nicht erprobt werden konnte, sei die notwendige präzise Ansteuerung der Filter genannt, die nicht leicht

¹⁾ Derartige Gitter werden Moiré-Gitter genannt.

realisierbar ist, weil eine exakt definierte Einhaltung einer vorgegebenen Rotationsgeschwindigkeit der Gitter verlangt wird.

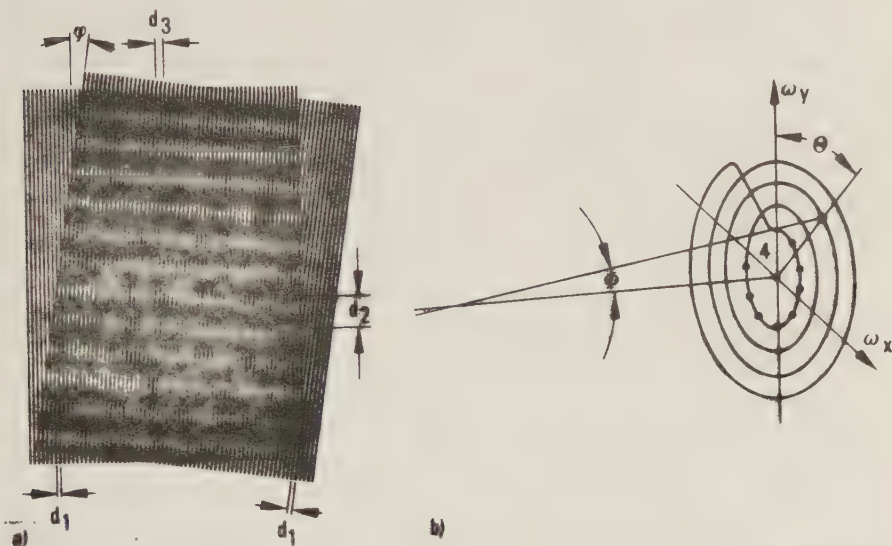


Bild 12. Herstellung und Ansteuerung einer Folge von Filterhologrammen auf einer Spirale b) mit einem rotierenden Moiré-Gitter a)

Zur Durchführung von ersten Prinzipversuchen zur holographischen Zeichenerkennung mit Gittern haben wir als Kanäle die nullte und die vier ersten Beugungsordnungen eines Amplituden-Kreuzgitters verwendet. Die damit erzielten experimentellen Ergebnisse werden gesondert in 6.1.3.1 beschrieben. Weitere Experimente zur besseren Ausnützung der Speicherkapazität der photographischen Schichten der Filterplatten mit Hilfe von Gittern (jedoch nicht holographisch), haben außerdem Armitage und Lohmann /86/, Müller /87/, Bestenreiner und Deml /88/ u.a. durchgeführt. Derartige Winkelkodierungsverfahren nennt man auch „Theta-Modulationsverfahren“.

Die bei der Durchführung der ersten Prinzipversuche mit Hilfe der bisher beschriebenen Vielfachbeleuchtungsverfahren (z.B. mittels Hologrammen oder einfachen Gittern) erzielten Ergebnisse haben im allgemeinen gezeigt, daß mit Hilfe dieser Methoden nur die Realisierung - zumindestens mit tragbarem Aufwand - einer im Verhältnis zum praktischen Bedarf relativ niedrigen Filterzahl möglich ist. Die erforderliche Filterzahl für sämtliche Zeichen, z.B. der OCR-B Normschrift (Bild 43), dürfte jedoch viel höher liegen, weil für jedes Zeichen Zusatzfilter zur Kompensation von Abweichungen von der Normgröße, von der Sollage usw. (vgl. 4.3.4) notwendig sind. Wir haben deshalb versucht, weitere, ebenfalls einfache, vor allem aber leistungsfähigere Methoden zu entwickeln. Bevor wir sie jedoch näher beschreiben, sei zum besseren Vergleich in beiden nachfolgenden Abschnitten die Diskussion über die Vor- und Nachteile der parallelen und seriellen Filteransteuerungsmethoden vorgezogen. Die Kombination beider Methoden (d.h. die quasiparallele Filteransteuerung) wird nicht gesondert erläutert, weil die dabei auftretenden Verhältnisse leicht aus der Diskussion beider genannten Methoden abgeleitet werden können.

4.3.3. Wirkungsgrad bei paralleler und sequentieller Filteransteuerung

Der Hauptvorteil der parallelen Ansteuerung der Filter eines Vielkanalkorrelators ist im Vergleich zu den sequentiellen Ansteuerungsmethoden zweifellos die sehr hohe Rechengeschwindigkeit, die damit (im Prinzip; vgl. 1) erreichbar ist. Sie ist bei der seriellen Filteransteuerung (je nach Verfahren) um die Zeit, die bis zur Ansteuerung des nächsten Filters benötigt wird, entsprechend niedriger. Im folgenden wird deshalb gezeigt (Bild 13), daß zwischen hohen Rechengeschwindigkeiten einerseits und Wirkungsgraden und Signal-Störlicht-Verhältnissen (vgl. 4.3.4) andererseits nur eine Kompromißlösung optimal sein kann.

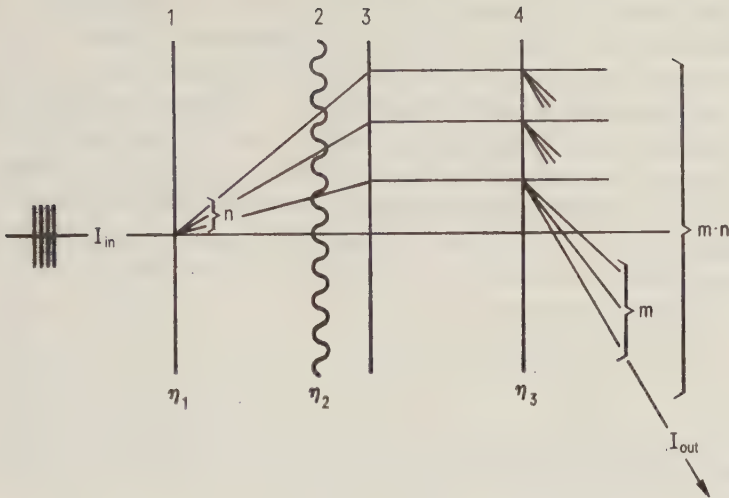


Bild 13. Zur Berechnung des Beugungswirkungsgrades bei paralleler und sequentieller Ansteuerung der Filter eines Vielkanalkorrelationssystems.
1 Beleuchtungswellengenerator, 2 Objekt, 3 Transformationslinse, 4 Filterhologramm

Die ungünstig wirkende Verminderung des Wirkungsgrades ist vor allem auf die Aufteilung der zur Verfügung stehenden Lichtintensität in mehrere Teilwellen (vgl. 4.3.1 und 4.3.2) und auf die damit zusammenhängenden Intensitätsverluste zurückzuführen. Bezeichnet man mit η_1 den Beugungswirkungsgrad des Beleuchtungswellengenerators 1 (z.B. der Hologramme oder des Gitters), mit η_2 den der Zeicheninformation 2, mit η_3 den des angepaßten Filters 4 und mit n die Anzahl der unabhängigen Kanäle, die vom Beleuchtungsgenerator parallel erzeugt werden, dann kann (bei paralleler Filteransteuerung) die Ausgangsleistung $I_{out,p}$ des Erkennungssignals (vgl. auch /81/) aus folgender Gleichung ermittelt werden:

$$I_{out, p} = \frac{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}{n} \cdot a \cdot I_{in}. \quad (13)$$

I_{in} bedeutet die Lichtintensität vor dem Generator 1 und α den Verlustfaktor sämtlicher Systemkomponenten. Die Nutzsignalintensität $I_{out,p}$ ist zusätzlich durch den Faktor m zu dividieren, wenn durch lineare Überlagerung an jeder einzelnen Filterstelle z.B. m Filter überlagert werden, die sich durch die Referenzwellenrichtung (vgl. 4.2) unterscheiden. Die praktisch zu erwartende Signalintensität dürfte demnach nur einige Prozent betragen. Bei sequentieller Filteransteuerung verbessert sich dagegen der Beugungswirkungsgrad des Generators 1 um den Faktor n , so daß die Intensität des Erkennungssignals (im Vergleich zum ersten Fall) sich um den gleichen Faktor n erhöht. Sie beträgt also

$$I_{out,s} = n \cdot I_{out,p} \quad (14)$$

Die bei der sequentiellen Filteransteuerung um den Faktor n vergrößerte Signalintensität wird also mit einer entsprechend niedrigeren Rechengeschwindigkeit erkauft.

4.3.4. Signal-Störlicht-Verhältnisse und Organisationsform der Detektorenelemente

Der gravierende Nachteil bei parallel ansteuerbaren Vielkanalkorrelationssystemen ist nicht die relativ niedrige Nutzsignalintensität (vgl. 4.3.3), die bei entsprechend höherem Kostenaufwand (beispielsweise durch Verwendung von leistungsstärkeren Lichtquellen und (oder) empfindlicheren Detektoren) weitgehend kompensiert werden kann, sondern, wie wir im folgenden sehen werden, vielmehr die äußerst ungünstigen Signal-Störlicht-Verhältnisse. Sie hängen von den Ansteuerungsmethoden ab und sind in erster Linie auf die Überlagerung benachbarter oder auch auf die am gleichen Ort entstehenden Kreuzkorrelationssignale zurückzuführen. Bei Registrierung der Signalintensität mit festen Photodetektoren¹⁾ kommen weitere Probleme hinzu, weil dadurch

1) Die Registrierung und quantitative Auswertung der Signalintensität kann, wie Hutzler /90/ gezeigt hat, auch mit Hilfe eines Fernsehsystems erfolgen. Zur Feststellung der Intensitätshöhen, -breiten und -abstände werden dafür die von der Fernsehkamera (z.B. Plumbicon-Röhre) gelieferten Video-Signale elektronisch ausgewertet, die bei Abbildung der Korrelationssignale auf die photoempfindliche Schicht der Kamera entstehen. Die in diesem Abschnitt diskutierten Signal-Störlicht-Verhältnisse gelten weitgehend auch für diese Methode.

die Signalintensitäten nur in integraler Form (d.h. über die ganze effektive Fläche der Detektoren) registriert werden können. Auch geringe Zeichenverschiebungen in der Eingabeebene führen deshalb zwangsläufig zur Änderung der Sollsignalintensitäten und damit auch zu Fehlinterpretationen. Die Größe der effektiven Fläche der einzelnen Detektorelemente, und damit auch ihr Abstand, wird also nicht nur aus dem Durchmesser der Autokorrelationssignale, sondern auch aus der Größe der zulässigen Zeichenverschiebungen in der Eingabeebene bestimmt, da die Eigenschaft der „Translationsinvarianz“ bei holographischen Korrelatoren (vgl. 3.1) nur die von der Zeichenlage unabhängige Entstehung des Korrelationssignals bedeutet und nichts über den Signalort¹⁾ in der Detektorebene aussagt. Der Signalort hängt in erster Linie von der Lage der Zeichen in der Eingabeebene sowie von den Systemparametern ab /89/. Durch Messungen, die wir mit unserem experimentellen Aufbau (vgl. 4.3.6.1) durchgeführt haben und sich deshalb nur auf dieses System beziehen, wurde festgestellt, daß 5 mm Zeichenverschiebungen eine örtliche Versetzung des Autokorrelationsmaximums um 1,5 mm zur Folge haben. Der Durchmesser des Autokorrelationssignals ist abhängig von der Größe der Zeichen und der Filter sowie von der Brennweite der Abbildungslinse der Korrelationssignale; er betrug in unserem System ca. 0,1 mm.

Der Entstehungsort der Auto- und Kreuzkorrelationssignale sowie die Signal-Störlicht-Verhältnisse und die Organisationsform der Detektorelemente werden aus der Diskussion folgender vier Fälle erkennbar:

¹⁾ In 6.2.2 wird weiterhin gezeigt, daß die Eigenschaft der „Translationsinvarianz“ nur innerhalb bestimmter Grenzen praktisch interessant ist, weil sonst die Dicke der photographischen Schicht die Signalintensität sehr stark reduzieren kann.

a) Zeichenerkennung beim Einkanal-Betrieb



Bild 14a. Verteilung der Korrelationssignale in der Detektorebene beim Einkanalbetrieb

Die rechte Aufnahme in Bild 14a) zeigt in schematischer Form die Verteilung der Korrelationssignale, die bei Ansteuerung eines einzigen Filters mit dem RFS des links im Bild wiedergegebenen Zeichenfeldes entstehen; vgl. auch Bild 28. Das holographische Filter sei in dem hier betrachteten Modellbeispiel für den Buchstaben A hergestellt worden. Die Zuordnung der Auto- und Kreuzkorrelationssignale, die mit A bzw. K gekennzeichnet sind, entsprechen der Zuordnung der Zeichen in dem Zeichenfeld. Durch die Indizes A,B,C,... ist weiterhin die Zugehörigkeit der Korrelationssignale zu den Zeichen (Buchstaben) A, B bzw. C, usw. des Zeichenfeldes angedeutet. In diesem Fall der einfachen Filterung, die nur für wenige Anwendungen (vgl. z.B. 6.1.2.2) interessant sein kann, müssen also störend wirkende Überlagerungen von Auto- und Kreuzkorrelationssignalen beispielsweise durch passende Dimensionierung der Integrationslinse der Korrelationssignale oder durch Wahl passender Zeichenabstände vermieden werden. Die Organisationsform der Detektorelemente, die nur in Sonderfällen erforderlich sind (wenn beispielsweise aus Rationalisierungsgründen mehrere Fingerabdrücke gleichzeitig verarbeitet werden sollen), wird schließlich durch die örtliche Verteilung und durch die Abstände der Korrelationssignale bestimmt. Im Normalfall reicht also ein einziger Detektor aus.

b) Zeichenerkennung bei linearer Filterüberlagerung

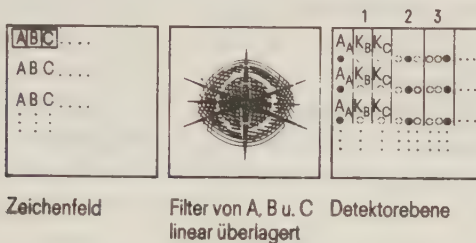


Bild 14b. Verteilung der Korrelationssignale in der Detektorebene bei linearer Filterüberlagerung

Das Bild 14b) zeigt in ähnlicher Weise (wie Bild 14a) die Zuordnung der Korrelationssignale sowie die sich daraus ergebende Organisationsform der Detektorelemente, wenn mit dem RFS des gleichen Zeichenfeldes statt eines Filters gleichzeitig ein Filtersatz angesteuert wird, der durch Überlagerung der RFS.n mehrerer Zeichen (vgl. 4.3.1) hergestellt worden ist. Wegen der linearen Überlagerung müssen deshalb zur Trennung der Korrelationssignale bei der Aufnahme der Filter jeweils unterschiedliche Referenzwellenrichtungen verwendet werden. Dies hat zur Folge, daß in der Detektorebene (Bild 14b) ein Vielfach von Lichtfeldern mit jeweils gleicher Anzahl von Korrelationssignalen entsteht; sie sind im Bild mit den Ziffern 1, 2, 3,... gekennzeichnet. Jedes von ihnen hat also dieselbe Signalzuordnung wie die der Zeichen in der Zeicheneingabeebene. Die Erhöhung der Anzahl der Korrelationsfelder ist deshalb mit einer um den gleichen Faktor vergrößerten Zahl von Photodetektoren verbunden. Da die Realisierung von Detektormatrizen mit größeren Detektorzahlen einen sehr hohen Aufwand erfordert, bedeutet eine derartige Erhöhung der Anzahl der Korrelationssignale (unter anderem) auch eine denkbare Einschränkung der gleichzeitig zu verarbeitenden Zeichen. Zur besseren Signaltrennung und

zum Einsatz von einfachen Detektoranordnungen wären also Vielkanalkorrelationssysteme mit sequentieller Filteransteuerung derartigen parallelen Systemen **vorzu-**ziehen.

- c) Zeichenerkennung bei örtlich getrennten Parallelkanälen
 Noch gravierender sind die Probleme bei paralleler Ansteuerung örtlich getrennter Filter mit nur einer Referenzwellenrichtung (Bild 14c), weil die Auto- und Kreuzkorrelationssignale sich in der Detektorebene überlagern. Eine Trennung der Korrelationssignale ist möglich, wenn als Detektorebene nicht die Brennebene der letzten Integrationslinse (Bild 4) sondern eine Ebene innerhalb oder außerhalb der Brennebene gewählt wird. Außer einer Verbreiterung der Korrelationssignale, die dadurch bedingt ist, muß man aber dabei damit rechnen, daß es Stellen geben kann, an denen Kreuzkorrelationssignale höhere Intensitätswerte besitzen als die Autokorrelationssignale. Eine Beschreibung der Lichtverhältnisse in dem Raum der Umgebung der Brennebene ist nach unserem Wissen bisher nicht erfolgt. Bei der von uns zur Trennung der Signale in einem derartigen System (vgl. 6.1.3.1) praktizierten „Defokussierung“ wurden keine Nachteile festgestellt.

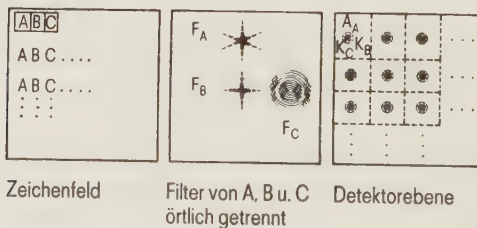


Bild 14c. Verteilung der Korrelationssignale in der Detektorebene bei örtlich getrennten Parallelkanälen

d) Zeichenerkennung durch Kombination von b) und c)

Durch Kombination beider zuletzt genannten Methoden ergibt sich eine zusätzliche Möglichkeit zur Zuordnung der Filter. Die bei einer derartigen Filterzuordnung in der Detektorebene entstehenden Signalverteilungen stellen ebenfalls eine Kombination der Lichtverteilungen von b) und c) dar und sind deshalb entsprechend komplizierter. Eine Ausnützung der Vorteile beider Methoden könnte jedoch in bestimmten Fällen sinnvoll sein.

Sowohl aus dem Vergleich der zuletzt beschriebenen Möglichkeiten der Zuordnung und Ansteuerung der Filterhologramme, als auch aus den Betrachtungen des Abschnitts 4.3.3 (über den Wirkungsgrad) geht hervor, daß ein Vielkanalkorrelator mit paralleler Filteransteuerung nur bei nicht zu großen Filterzahlen und bei relativ kleinen Zeichenfeldern (wenn sie gleichzeitig verarbeitet werden sollen) praktisch interessant sein kann. Eine große Filterzahl liegt bereits vor, wenn beispielsweise für die 26 Buchstaben des Alphabets zur Kompensation der Rotationsabhängigkeit (vgl. 6.1.2.2.2) jeweils 10 Filter benötigt werden. Diese Feststellung veranlaßte uns deshalb, nach leistungsfähigeren Systemen zu suchen, die mit geringem Aufwand realisierbar sind und nach Möglichkeit keine mechanisch bewegten Teile enthalten sollen. Bevor wir jedoch das unter diesen Gesichtspunkten und nach unseren Vorstellungen als optimal ausgewählte und labormäßig erprobte System ausführlich beschreiben, wird zunächst ein Vorschlag einer Anordnung diskutiert, die ohne Verwendung mechanisch bewegter Teile eine schnelle und präzise Kanalansteuerung ermöglichen kann.

4.3.5. Schalteranordnung zur schnellen und präzisen Kanalansteuerung

Die Nachteile der ungünstigen Signal-Störlicht-Verhältnisse (die, wie wir gesehen haben (vgl. 4.3.4), vor allem bei Systemen mit paralleler Filteransteuerung besonders gravierend sein können) und die bei Verwendung von mechanisch bewegten

Teilen zur Ansteuerung der Filterhologramme bedingte relativ langsame und unpräzise Filteransteuerung (bei quasiparalleler und sequentieller Filteransteuerung) könnten mit einer elektro-optischen Polarisations-Schalteranordnung (Bild 15) weitgehend vermieden bzw. verbessert werden.

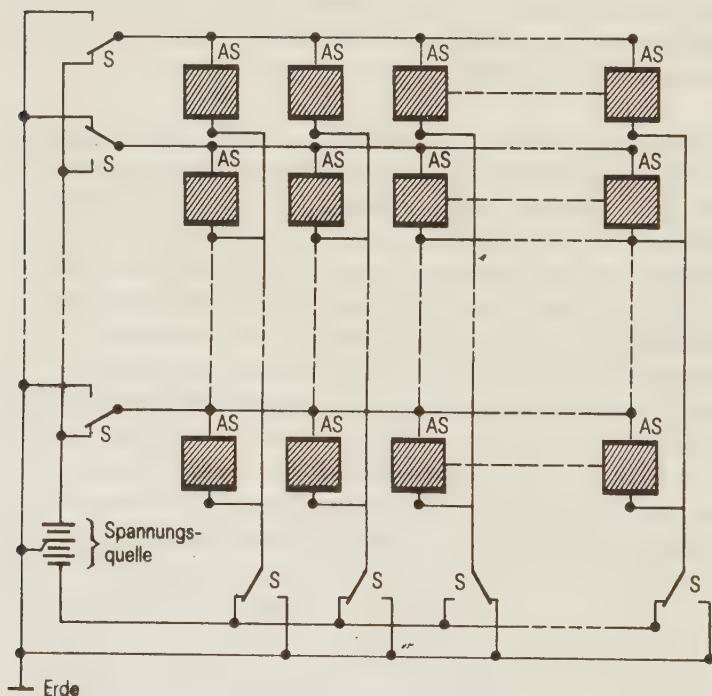


Bild 15. Schalteranordnung (schematisch)

Die Schalteranordnung, die aus mehreren z.B. matrixförmig angeordneten Schalterelementen (AS) bestehen kann, ist vor oder hinter der Filterebene anzubringen und muß so dimensioniert sein, daß jedem aktiven Schalter ein Kanal (Filter) zugeordnet wird. Als Schalter können wegen ihrer Trägheitslosigkeit beispielsweise Polarisations-schalter eingesetzt

werden /91/, die mit entsprechend dimensionierten elektromechanischen Geräten seriell umschaltbar sind. Werden dagegen keine sehr hohen Schaltgeschwindigkeiten verlangt, so kann die Rolle des Schalters, z.B. bei kreisförmiger Filterzuordnung, auch eine rotierende Lochblende übernehmen.

Der Hauptvorteil derartiger elektrooptischer Anordnungen liegt nun darin, daß weder die Richtung der Beleuchtungswelle (vgl. 4.2) noch der Lichtwellengenerator (vgl. 4.3.2) geändert bzw. bewegt werden muß. Die Schaltzeit kann außerdem so gesteuert werden, daß sie nicht begrenzend wirkt, wenn z.B. für die Signalauswertung (die trotz des parallelen Erscheinens der Signale im allgemeinen sequentiell erfolgt) einer größeren Signalanzahl eine längere Zeit erforderlich ist. Als Nachteil ist allerdings der geringe Wirkungsgrad (vgl. 4.3.3) zu erwähnen, der auf die Aufteilung der gesamten zur Verfügung stehenden Lichtintensität in mehrere Parallelkanäle zurückzuführen ist. Dieser Nachteil kann jedoch, wie wir auch in 4.3.3 erwähnt haben, bei Verwendung von hochempfindlichen Detektoren oder (und) leistungsstärkeren Lichtquellen ausgeglichen werden.

4.3.6. Sequentiell ansteuerbare Vielkanalkorrelationssysteme mit einer einfachen Keilplatte als Beleuchtungswellen-erzeuger

Eine weitere Möglichkeit zur Realisierung eines Vielkanalkorrelators, der nicht nur zur rationelleren Durchführung von wichtigen Prinzipversuchen, sondern auch in der Praxis eingesetzt werden könnte, ist gegeben, wenn als Beleuchtungswellen-erzeuger eine mit nur einem Keilwinkel versehene Glasplatte verwendet wird (Bild 16). Wir verwendeten derartige Keilplatten in zwei labormäßigen Aufbauten, die sich hauptsächlich durch die Ansteuerungsgeschwindigkeit der Filter unterschieden. Der Hauptvorteil solcher optischer Gläser im Vergleich zu den Gittern oder Hologrammen (vgl. 4.3.2 bzw. 4.3.1) ist das Vermeiden der sonst starken Lichtverluste und Störungen (durch

Absorption, Reflexion, Gittermodulation etc.), weil derartige Gläser relativ einfach in guter optischer Qualität hergestellt werden können. Da die Filteransteuerung sequentiell erfolgt, sind außerdem bessere Signal-Störlicht-Verhältnisse erreichbar (vgl. 4.3.4).

4.3.6.1. Vielkanalkorrelationssystem mit niedrigen Filteransteuerungsgeschwindigkeiten

Wie die schematische Darstellung in Bild 16 im Prinzip zeigt, bewirkt die Keilplatte 4, die im Raum zwischen Objekt- und Filterebene 3 bzw. 6 anzuordnen ist, eine vom Keilwinkel abhängige Versetzung der optischen Achse. Der die Objektebene passierende und beim Vorhandensein eines Zeichens (oder Zeichenfeldes), das z.B. als Negativ vorliegt, mit der Zeicheninformation modulierte Anteil der Objektbeleuchtungswelle 1 gelangt auf die Keilplatte und wird anschließend durch die Fouriertransformationslinse 5 an eine Stelle in der Filterebene 6 projiziert, die außerhalb der ursprünglichen optischen Achse liegt. Läßt man nun die Keilplatte um die optische Achse des Systems rotieren, so bildet der Objektstrahl einen Kegel, der in gleicher Form die anschließende Sammellinse 5 durchsetzt. Dies hat weiterhin zur Folge, daß das RFS in der Filterebene 6 auf einem Kreis wandert, dessen Durchmesser in erster Linie vom Keilwinkel und von der Brennweite der Transformationslinse abhängt. Bei einem Keilwinkel von 3° und einer Linsenbrennweite von 500 mm betrug dieser Kreisdurchmesser in unserem System ca. 40 mm. Auf diese Weise kann man also in bestimmten Rotationslagen der Keilplatte holographische Filter herstellen, die anschließend durch Rotation der Keilplatte seriell angesteuert werden können.

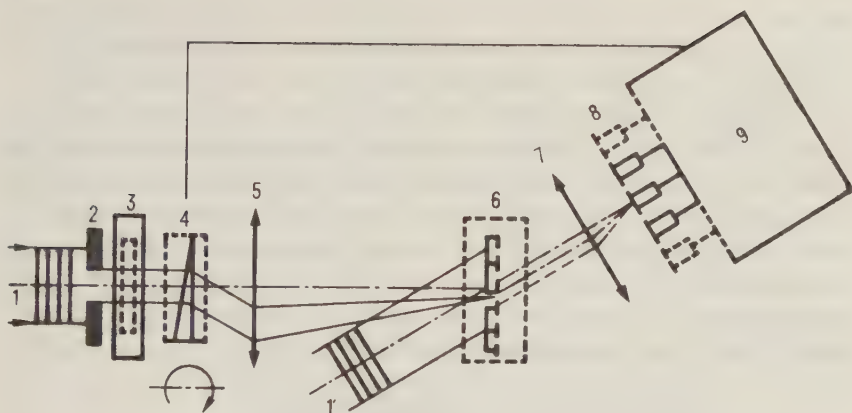


Bild 16. Schematische Darstellung des verwendeten Vielkanal-korrelationssystems mit einer Keilplatte als Lichtablenker (vgl. auch Bild 7).

1 u. 1' Objekt- bzw. Referenzwelle, 2 Blende zur Begrenzung der Objektwelle, 3 Objektebene, 4 Keil-Platte mit Rotationsvorrichtung, 5 Transformationslinse, 6 Filterebene mit Vorrichtung zur chemischen Bearbeitung der Photoplaten, 7 Sammellinse, 8 Detektoren, 9 Auswerteelektronik

Zur Durchführung der eingangs erwähnten Grundversuche, deren experimentelle Ergebnisse in 6.1.3.2 beschrieben werden, verwendeten wir zuerst eine relativ einfache Rotationsvorrichtung, die so dimensioniert wurde, daß nur niedrige Rotationsgeschwindigkeiten erreicht werden konnten.

Bild 17 zeigt diese Vorrichtung. Die Keilplatte 4, die einen effektiven Durchmesser von 45 mm hatte, wurde in einer Halterung 3 befestigt. Der Rand der Halterung trug Einkerbungen, so daß definierte Winkellagen der Keilplatte mit Hilfe des seitlich befestigten Stiftes 5 zur Filterherstellung fest eingestellt werden konnten. Die Stiftspitze, die zu den Einkerbungen paßte, wurde zwecks einer besseren Reproduzierbarkeit der Positionierungsgenauigkeit der Keilplatte konusförmig hergestellt. Die dazu erforderliche hohe Präzision der Stiftführung geschah mit

der am Rahmen befestigten Stifthalterung und der dazugehörigen Feder. Die so gestaltete Keilplattenhalterung wurde mit dem Rahmen mit einem Kugellager so verbunden, daß sie mit Hilfe des Motors 1 und eines Keilriemens 2 um die optische Achse des Korrelationssystems rotieren konnte. Die Rotationsgeschwindigkeit war kontinuierlich regelbar (durch Änderung der Spannung des Netzgerätes). Sie betrug max. 18 U/min. Als Antriebsmotor diente die Type GR 21 x 30 der Firma Dunker-Motoren. Die Vorrichtung wurde schließlich, wie auch die übrigen Systemkomponenten, auf einem schweren Metallklotz befestigt und im Strahlengang des Korrelators einjustiert.

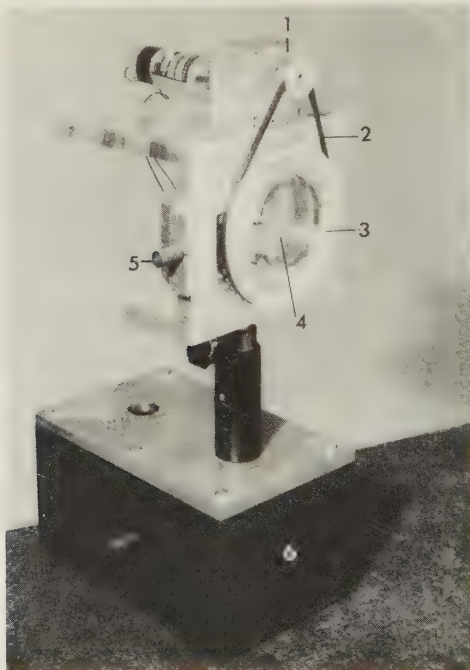


Bild 17. Keilrotationsvorrichtung zur Erzeugung von niedrigen Filteransteuergeschwindigkeiten.
1 Motor, 2 Keilriemen, 3 Keilplattenhalterung, 4 Keilplatte, 5 Feststellstift, 6 Klotz

4.3.6.2. Vielkanalkorrelationssystem mit höheren Filteransteuerungsgeschwindigkeiten

Zu einer rationelleren und vor allem praxisnäher orientierten Durchführung von Untersuchungen wurden a) eine schneller rotierende Vorrichtung (als die in 4.3.6.1 beschriebene) und b) eine Signalauswerteelektronik konzipiert, gebaut und erprobt. Im folgenden wird in erster Linie nur die schnelle Rotationsvorrichtung beschrieben. Die Auswerteelektronik wird nur soweit erwähnt, wie es für das Verständnis ihrer Funktion im Zusammenhang mit dem hier beschriebenen System erforderlich ist. Eine detailliertere Beschreibung darüber ist in /92/ zu finden.

Da die Lesegeschwindigkeit eines sequentiell ansteuerbaren Systems proportional der Rotationsgeschwindigkeit der Keilplatte ist (vgl. 4.3.6.3), sind im allgemeinen möglichst hohe Drehzahlen erstrebenswert. Zur Realisierung unserer oben erwähnten Ziele innerhalb eines vertretbaren Zeitraumes mit tragbarem Aufwand wurde eine Keilrotationsvorrichtung verwendet (Bild 18), deren Geschwindigkeit stufenlos bis max. ca. 3000 U./min erhöht werden konnte. Zur Rotation der Keilplatte, die zuerst in einer geeigneten Halterung und anschließend in einem Doppelwälzlagerblock befestigt war, wurde der leistungsfähigere Motor (als der Dunker-Motor; vgl. 4.3.6.1) ZSH52-8-5A der Firma Phytron, Gröbenzell, mit einer passenden elektronischen Steuerung (Typ: FES 250 der gleichen Firma) verwendet. Der Lagerblock war mit dem Motor über einen Zahnriemen verbunden. Der Keilwinkel und der Durchmesser der effektiven Fläche der Platte betrugen $2^{\circ}20'$ bzw. 35 mm. Die scheibenförmige Keilplattenhalterung trug an der einen Seite 36 Einkerbungen (zur Filterherstellung) und an ihrem Rand zwei Teilkreise mit zwei Taktspuren, die in Verbindung mit zwei Rückmeldespulen die Taktimpulse zur Bestimmung der Winkellage lieferten.

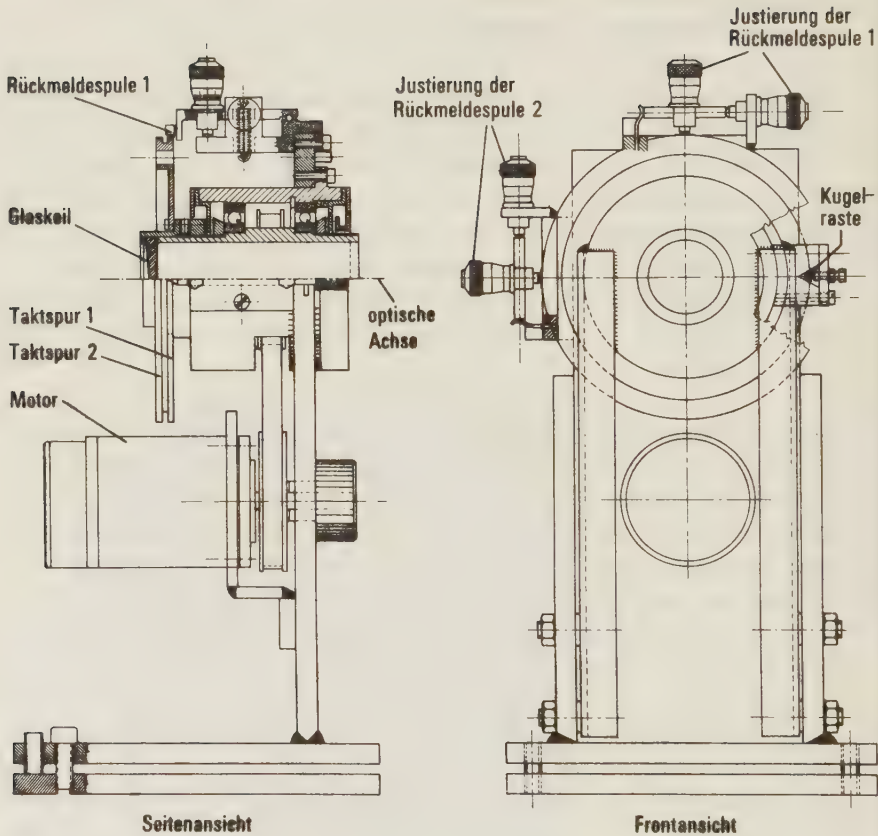


Bild 18. Keilrotationsvorrichtung zur Erzeugung von höheren Filteransteuergeschwindigkeiten (schematisch)

In Übereinstimmung mit der Anzahl und Lage der Einkerbungen hatte der eine Teilkreis in Abständen von jeweils 10° insgesamt 36 Vertiefungen. Der zweite Teilkreis besaß dagegen nur eine Vertiefung, die zur Ermittlung der Zyklenzahl und damit auch der Zyklusanfänge diente. Die Rückmeldespulen konnten mit Hilfe von Mikrometerschrauben so justiert werden, daß sowohl die Impulsform als auch die Übereinstimmung zwischen Impuls

und Filterlage optimiert bzw. eingestellt werden konnten. Die genaue Ermittlung der Filterlage ist notwendig, weil die Autokorrelationsintensität nur an dieser Stelle ihren maximalen Wert besitzt.

Die Anzahl der in der Detektorebene parallel erscheinenden Korrelationssignale ist gleich der Anzahl der gleichzeitig beleuchteten Zeichen, weil mit diesem System die Ansteuerung der Filter nur sequentiell erfolgen kann. Im Hinblick auf möglichst hohe Erkennungsgeschwindigkeiten ist deshalb eine parallele Auswertung sämtlicher Korrelationssignale mit getrennten Photodetektoren und dazugehörigen elektronischen Auswertungseinheiten vorteilhaft. Wegen des hohen Aufwandes werteten wir jedoch nur eines von den insgesamt fünf zur Verfügung stehenden Korrelationssignalen aus. Die Intensitäten der Signal-Lichtimpulse wurden mit Hilfe einer Glasfaser (150 μ m Durchmesser) auf die photoempfindliche Schicht eines Sekundärelektronenvervielfachers und anschließend gemeinsam mit den Taktimpulsen entweder auf die elektronischen Auswertungseinheiten oder auf einen der Kanäle eines Mehrstrahloszillographen geleitet.

Zum stabileren Aufbau sämtlicher Bauteile verwendeten wir hier Gleitschienen und Reiter der Firma Micro-Controle (Frankreich); die Gleitschienen wurden an der Granitplatte mit Schrauben befestigt. Bild 19 zeigt eine Aufnahme des kompletten Aufbaues dieses Vielkanalkorrelators.

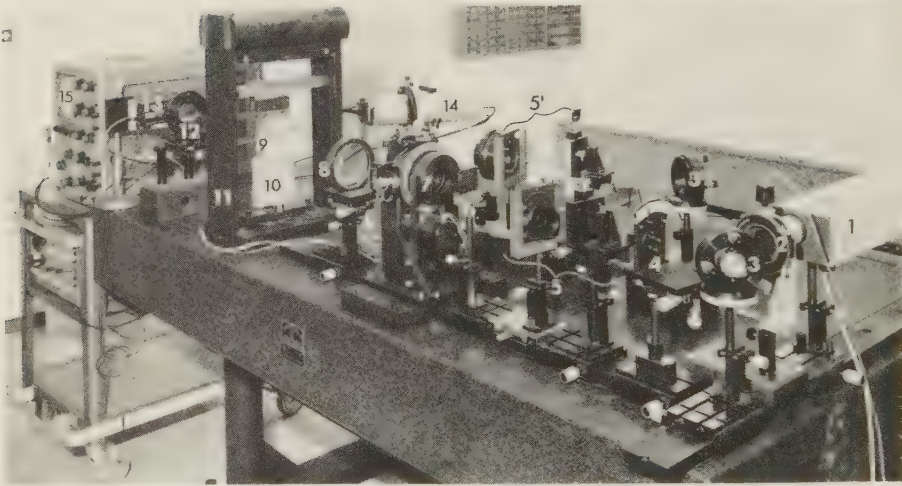


Bild 19. Aufnahme des Gesamtaufbaus des verwendeten Vielkanalkorrelationssystems mit höheren Filteransteuerungsgeschwindigkeiten.

1 Laser, 2 Lichtverschluß, 3 u. 3' Umlenkspiegel, 4 Strahlteiler, 5 u. 5' Aufweitungssysteme, 6 Zeichenfeld (Eingabeebene), 7 Keilrotationsvorrichtung, 8 Transformationslinse, 9 Photoplatte mit Filterhologrammen, 10 Chemikalienbehälter, 11 Photokassette, 12 Sammellinse, 13 Photodetektor (Glasfaser mit Glasfaserleitung), 14 Sekundärelektronenvervielfacher, 15 Oszillograph

4.3.6.3. Lesegeschwindigkeit

Die Lesegeschwindigkeit N eines sequentiellen Vielkanalkorrelationssystems ist nicht nur von der bereits in 4.3.6.2 erwähnten Rotationsgeschwindigkeit der Keilplatte, d.h. von der Anzahl n der pro Sekunde angesteuerten Filter abhängig, sondern sie hängt auch von der Halbwertsbreite s der Korrelationssignale, vom Durchmesser w der effektiven Detektorfläche, von der Größe D der Zeichen (z.B. Ziffern) und vom Abstand d zwischen zwei

benachbarten Zeichen nach folgender Beziehung /93/¹⁾ ab:

$$N = n \cdot (s \cdot w) / D \cdot d \quad (15)$$

Bei einer Rotationsgeschwindigkeit von maximal 3000 U./min und 30 Filterhologrammen, die für unser System vorgesehen wurden, ergibt sich für n der Wert 1500 Hz. Wählen wir weiterhin $s = 0,05$ mm, $w = 0,3$ mm, $D = 2,5$ mm und $d = 1$ mm, Werte, die weitgehend den realistischen Werten entsprechen, dann beträgt die nach dieser Gleichung berechnete Lesegeschwindigkeit 150 Zeichen pro Sekunde und Detektorkanal.

Bei paralleler Ansteuerung mehrerer Filter und gleichzeitiger Beleuchtung mehrerer Zeichen erhöht sich auch entsprechend die Lesegeschwindigkeit. Da die Rechenoperationen (Multiplikationen und Integrationen) mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen, wird also die Lesegeschwindigkeit hauptsächlich von der Apertur der Transformationslinse /37/ und vom Filterwechsel bestimmt. Bei Ansteuerung von 100 Filtern/s, 30 Filterhologrammen und gleichzeitiger Beleuchtung einer Schriftseite (10^3 Zeichen) ergibt sich /38/ eine Verarbeitungsgeschwindigkeit von $3,3 \times 10^8$ bit/s. Realisiert sind außerdem bisher /115/ (in einem Spezialfall zur Auswertung von Radaraufnahmen) Analogrechner mit der viel höheren Geschwindigkeit von 10^{12} bit/s. Diese Geschwindigkeit verdeutlicht also den Vorteil derartiger Rechner zu den üblichen digitalen Systemen, deren Geschwindigkeit z.Z. ca. 10^7 bit/s beträgt.

¹⁾ Die gleichen Autoren beschreiben auch ein Vielkanalkorrelationssystem, bei dem sie ebenfalls eine Keilplatte verwendeten. Da jedoch dieses Verfahren kurze Zeit später bekannt wurde als das von uns beschriebene und in /94/ als möglicher Lösungsweg vorgeschlagene System, handelt es sich offensichtlich um eine gleichorientierte, parallele und unabhängige Zielsetzung.

4.3.7. Vorschlag zur Erhöhung der Filterkapazität durch Verwendung einer Keilplatte mit einem Winkelvielfach

Die kreisförmige Anordnung der Filterhologramme ist bei den bisher betrachteten (vgl. 4.3.6) sequentiell anzusteuernenden Vielkanalkorrelationssystemen vorteilhaft, weil Filterherstellung und -ansteuerung relativ einfach sind. Dies gilt vor allem dann, wenn es sich um den Aufbau eines Systems handelt, das zur rationellen Durchführung von Prinzipversuchen geeignet sein soll; vgl. 4.3.6 und 4.3.3. Um zu höheren Lesegeschwindigkeiten zu gelangen, die in der Praxis erforderlich sind, ist es deshalb notwendig, daß sowohl die Filterzahl als auch die Ansteuerungsgeschwindigkeit der Filter erhöht werden müssen.

Bei der kreisförmigen Anordnung der Filter auf einer einzigen Ringzone können jedoch diese Forderungen nicht erfüllt werden, weil die Fläche dieser Zone nicht beliebig groß gewählt werden kann. Eine Erhöhung der Packungsdichte der Filter (= Anzahl der Filter pro Flächeneinheit) ist andererseits nicht sinnvoll, weil, wegen der extrem unterschiedlichen Intensitäten der Beugungsmaxima in der Filterebene, sehr leicht lokale Übersteuerungen der photographischen Schicht auftreten können, die zu ungünstigen Signal-Störlicht-Verhältnissen führen. Die Packungsdichte hängt außerdem von der Größe der Filter ab. Im folgenden wird deshalb eine optische Anordnung vorgeschlagen, die aus einer Keilkombination mit unterschiedlichen Keilwinkeln besteht und eine Erhöhung der Anzahl der Filterhologramme ermöglichen kann.

Bei gleichzeitiger Beleuchtung sämtlicher Keilelemente dieser Anordnung, die für zwei Elemente in Bild 20 schematisch dargestellt ist und im Korrelator am besten zwischen dem Aufweitungssystem und der Objektebene) angebracht werden kann, mit dem aufgeweiteten Laserstrahl 1 bewirken die unterschiedlichen Keilwinkel, daß hinter der Anordnung eine ihnen gleich große Anzahl von Lichtbündeln entsteht, die sich anschließend unter ebenfalls verschiedenen Winkeln treffen.

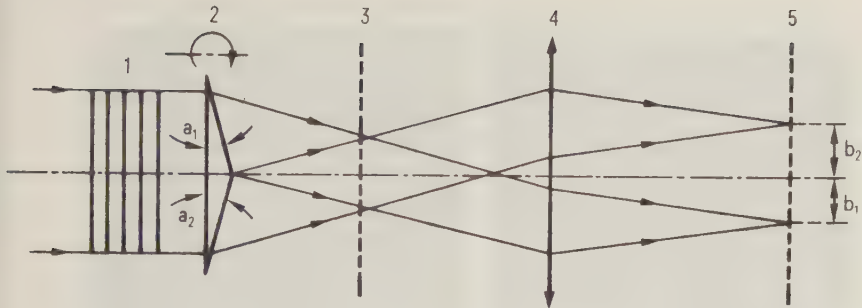


Bild 20. Schematische Darstellung der Teilstrahlengänge bei Verwendung der vorgeschlagenen Keilanordnung, 1 ebene Welle, 2 rotierende Keilplatten ($a_1 \neq a_2$), 3 Objektebene, 4 Transformationslinse, 5 Filter- bzw. Raumfrequenzebene ($b_1 \neq b_2$)

Wählt man nun die Ebene, in der sie sich optimal treffen, als Objektebene, dann wird ein an dieser Stelle angebrachtes Objektfeld gleichzeitig mit allen Lichtbündeln beleuchtet. Wegen der unterschiedlichen Winkel ($a_1 \neq a_2$) der einzelnen Bündel erscheint deshalb in der Filterebene 5 eine entsprechend große Anzahl von RFS.n, die in verschiedenen großen Abständen ($b_1 \neq b_2$) von der optischen Achse liegen.

Im Gegensatz zu dem in 4.3.6.1 beschriebenen Vielkanalkorrelator stehen also nun mehrere Zonen zur Verfügung, die zur Speicherung einer entsprechend größeren Anzahl von Filterhologrammen als bisher verwendet werden können.

Je nach Art der Zuordnung können die Filterhologramme sowohl paar- oder multipelweise als auch seriell angesteuert werden. Beide Ansteuerungsmöglichkeiten werden anhand der in Bild 21 bei einem Prinzipversuch gewonnenen Aufnahmen erläutert.

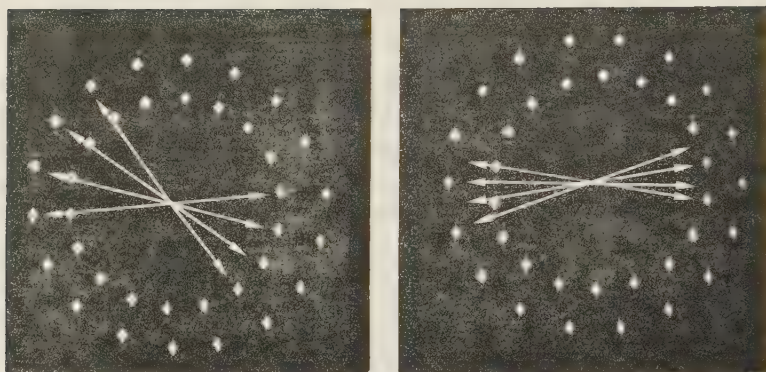


Bild 21. Raumfrequenzspektren zur Demonstration der paar- oder multipelweisen (links) und seriellen (rechts) Filteransteuerung, aufgenommen mit einer Vorrichtung nach Bild 20

Als Keilanordnung diente dabei der Einfachheit halber eine mit nur zwei Winkeln hergestellte Platte. Da diese Anordnung die gleiche Form hatte wie die in Bild 20, liegen beide parallel entstehenden RFS.n genau um 180° entgegengesetzt auf der Peripherie der Kreise, die durch sie bestimmt sind¹⁾. (Der Mittelpunkt der konzentrischen Kreise liegt also auf der Verbindungslinie beider RFS.n.) Der Winkelabstand zwischen den einzelnen RFS.n beträgt bei der rechten Aufnahme 10° und bei der linken 20° .

a) Paar- bzw. multipelweise Filteransteuerung:

Paar- bzw. multipelweise Ansteuerung ist möglich (vgl. linke Aufnahme), wenn die Filter, die parallel anzusteuern sind, bei gleicher Winkelstellung (ohne Änderung der Rotationslage der Keilplatte) hergestellt worden sind. Sie liegen deshalb auf der Geraden, die durch den gemeinsamen Kreismittelpunkt verläuft. Die Anzahl der gleichzeitig angesteuerten Filter hängt somit mit der Anzahl der Kanäle (Beleuchtungsbündel) der Keilanordnung zusammen.

¹⁾ Da es sich hier um einen Prinzipversuch gehandelt hat, zeigen beide Aufnahmen (Bild 21) nur die RFS.n des Buchstabens O.

Die Herstellung und Ansteuerung der übrigen Filter geschieht in ähnlicher Weise durch Rotation der Keilplatte. Die Zuordnung der gleichzeitig anzusteuernenden Filter ist bei diesem Demonstrationsbeispiel (Bild 21) durch Pfeile gekennzeichnet.

b) Serielle Filteransteuerung

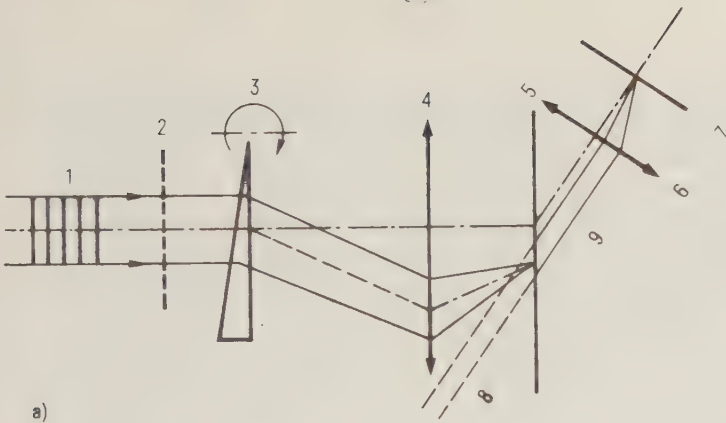
Die serielle Filteransteuerung, die ohne Verlust der charakteristischen Merkmale (hohe Filterzahl und Erkennungsrate) dieses Verfahrens erfolgen und für bestimmte Anwendungen vorteilhaft sein kann (vgl. 4.3.4), ist möglich, wenn im Gegensatz zu a) bei der Filterherstellung dafür gesorgt wird, daß die Keilplatte nach jeder Filteraufnahme schrittweise um einen vorgegebenen Winkel um die optische Achse gedreht wird. Dadurch entsteht eine Filterzuordnung, wie sie für zwei Beleuchtungsbündel in der rechten Aufnahme von Bild 21 dargestellt ist. Bei einer derartigen Filterzuordnung ist also die Ansteuerung der Filter seriell, weil während der Ansteuerung eines Filters die übrigen RFS.n sich an solchen Stellen befinden, wo keine Filter vorhanden sind.

Bei Verwendung von derartigen Keilplatten zur Erzeugung eines Beleuchtungswellenvielfaches können also in relativ einfacher Weise sowohl die Lesegeschwindigkeit als auch die Filterzahl eines Vielkanalkorrelators wesentlich erhöht werden. Die Aufteilung der Gesamtlichtintensität in mehrere Bündel führt jedoch auch hier (vgl. 4.3.1 und 4.3.2) zwangsläufig zur Verringerung der Signalintensität. Dies kann aber bei Bedarf ebenfalls durch die Verwendung von intensitätsstärkeren Lichtquellen und (oder) lichtempfindlichen Photodetektoren weitgehend ausgeglichen werden. Die Aufteilung der Gesamtintensität in mehrere Bündel durch derartige optische Keilanordnungen ist trotzdem vorteilhafter als eine Aufteilung mit anderen Mitteln (vgl. z.B. 4.3.1 und 4.3.2), weil sie (nahezu) verlustfrei erfolgt.

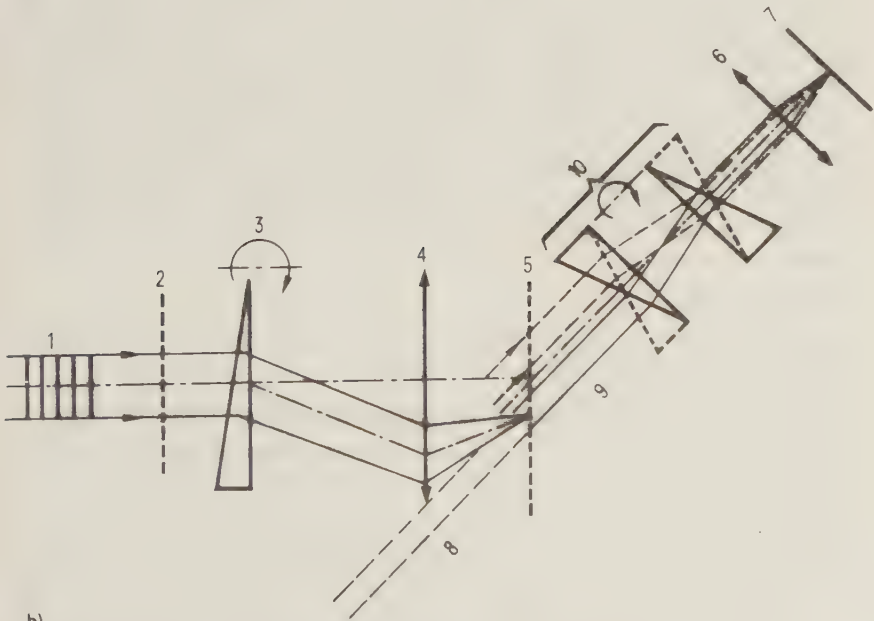
4.3.8. Weitere Probleme und mögliche Lösungen

Die Leistungsfähigkeit der bisher beschriebenen Vielkanal-korrelationssysteme mit örtlich getrennter Filterzuordnung wird unter anderem auch dadurch begrenzt, daß das Zentrum der durch die Ansteuerung der Filterhologramme in der Richtung der Referenzwelle rekonstruierten Signalfelder 9 (Bild 22a) nicht mit der optischen Achse der Linse 6 zusammenfällt, die zur Abbildung der Korrelationssignale verwendet wird. Diese Abweichung des Zentrums der Signalfelder von der optischen Achse hängt von der Lage des jeweils angesteuerten Filters ab. Die Größe der Signalfelder dagegen ist durch die Größe des Zeichenfeldes bestimmt, das gleichzeitig beleuchtet wird. Das Zentrum der Signalfelder 9, die z.B. bei Ansteuerung von kreisförmig zugeordneten Filtern 5 rekonstruiert werden, liegt also ungünstig (wegen des Abbildungsfehlers der Linse) auf einem Kreis, dessen Durchmesser vom Abstand des Filterkreises zur optischen Achse des Systems bestimmt wird. Der Nachteil der nicht fehlerfreien Abbildung der Korrelationssignale, der bekanntlich mit wachsendem Abstand von der optischen Achse zunimmt, kann deshalb vor allem bei leistungsfähigeren Systemen eine große Rolle spielen, weil bei solchen Systemen sowohl größere Filterzahlen als auch die Beleuchtung von größeren Zeichenfeldern erforderlich sind.

Zur optimalen Führung des Zentrums der Signalfelder 9 durch die optische Achse der Abbildungslinse 6 sind mehrere Lösungswege denkbar, die sich hauptsächlich durch den erforderlichen Aufwand unterscheiden. Sehr aufwendig (und deshalb eventuell unrealisierbar) wäre z.B. eine mit den Signalfeldern synchron rotierende Abbildungslinse 6. Eine derartige Linsenbewegung hätte außerdem eine unerwünschte Wanderung der Korrelationssignale in der Detektorebene 7 zur Folge. Denkbar wäre weiterhin die gekoppelte Rotation der Linse 6 und der Detektoren 7. Dieser Lösungsweg erfordert jedoch vor allem wegen der Größe der Linse und der Größe und Empfindlichkeit der Detektoren einen relativ großen Aufwand und ist deshalb ebenfalls unrealistisch.



a)



b)

Bild 22. Holographischer Vielkanalkorrelator,
a) in einfacher Form,
b) mit achsennaher Signalwellenführung.
1 ebene Objektwellen, 2 Objektebene, 3 rotierende
Keilplatte als Lichtwellengenerator, 4 Transforma-
tionslinse, 5 Filterebene, 6 Sammellinse, 7 Detektor-
ebene, 8 Referenzwellen, 9 Korrelationslichtfeld,
10 Kompensationssystem mit zwei rotierenden Keil-
platten

Erfolgreicher könnte dagegen die in Bild 22b) schematisch dargestellte Anordnung sein, die aus zwei um 180° um die optische Achse verdrehten Keilplatten 10 besteht¹⁾. Die Führung des Zentrums der rekonstruierten Signalfelder 9 durch die optische Achse der Linse kann mit Hilfe dieser Anordnung erzielt werden, wenn sie im Raum zwischen der Filterebene 5 und der Abbildungslinse 6 (Bild 22b) synchron mit dem Beleuchtungswellenerzeuger 3 (z.B. Keilplatte, Gitter usw.) rotiert. Eine derartige Bewegung der zwei Keilplatten, die zur Verringerung des Aufwandes in definiertem Abstand starr verbunden sein können, hat zur Folge, daß die Signalfelder unabhängig von ihrer Lage symmetrisch um die optische Achse der Linse geführt werden. In Bild 22b ist der Strahlengang für zwei um 180° unterschiedliche Winkellagen der Anordnung durch gestrichelte bzw. durchgehende Linien angedeutet. Abschätzungen haben ergeben, daß der Aufwand der Synchronisierung tragbar ist; er kann deshalb bei einem leistungsfähigeren Erkennungssystem in Kauf genommen werden. Prinzipversuche mit einem provisorischen Laboraufbau verliefen ebenfalls erfolgreich.

5. Methodisches

Zur Betrachtung und Beurteilung der Objektfunktionen (z.B. Photomasken) nach der Filterung und zur Messung der Lichtintensität der Korrelationssignale verwendeten wir je nach Bedarf sowohl qualitative als auch quantitative Meß- und Prüfmethoden, die in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden. Außer der direkten visuellen Betrachtungsweise der Objektbilder und der Korrelationssignale in der Bild- bzw. Signalebene, z.B. mit Hilfe einer Mattscheibe, wurden zur qualitativen Beurteilung hauptsächlich zwei Fernsehkamerasysteme (der Firmen Siemens und Sony) verwendet. In 5.1.2 wird außerdem gezeigt, daß derartige Systeme auch zu quantitativen Messungen von Signalintensitäten geeignet sein können.

¹⁾ Zu diesem Vorschlag haben auch die Herren R.Oberbacher und G.Widemann (Fa. Siemens) beigetragen.

P. Hutzler /90/ wertete bei ähnlichen Zeichenerkennungsexperimenten mit Erfolg das Videosignal eines gleichen Fernsehsystems aus; vgl. 4.3.4, Fußnote. Zur quantitativen Beurteilung der beugungswirksamen Randstruktur der Zeichen (Ziffern und Buchstaben), des Einflusses dieser Randstruktur auf die Lichtverteilung in der Raumfrequenzebene, und der Bandpaßcharakteristik der Filter verwendeten wir weiterhin mikroskopische und photographische Methoden sowie ein Filterabbildungsverfahren, das im Abschnitt 5.1.1 ausführlicher beschrieben wird.

Die quantitativen Methoden dienten in erster Linie zur Messung der Intensitäten von Auto- und Kreuzkorrelationssignalen. Nur in einem Ausnahmefall (vgl. 6.2.1) registrierten wir mit einer gleichen Methode die Signalintensität der Raumfrequenzkomponenten. Zu den quantitativen Methoden gehört auch die Registrierung und Auswertung der Korrelationssignale mit Hilfe der speziell dafür entwickelten Auswerteelektronik /92/.

In 5.1.2 werden schließlich die Parameter diskutiert, die die Qualität und die Reproduzierbarkeit der Filterhologramme beeinflussen. Diese Einflüsse werden größtenteils anhand experimenteller Ergebnisse erläutert und abgeschätzt.

5.1. Meß- und Prüfmethoden

5.1.1. Qualitative Methoden

Mikroskopisch vergrößerte Aufnahmen der Feinstruktur der Zeichen und direkte Aufnahmen der RFS.n sind erforderlich gewesen, weil der Intensitätsverlauf der Korrelationssignale in vielen Fällen (vgl. z.B. 6.2.1) nicht interpretierbar war. Die Feinstruktur der Zeichen wurde in dem Universalmikroskop der Firma Zeiss betrachtet. Markante Stellen wurden anschließend photographisch festgehalten und genauso wie die RFS.n visuell verglichen.

Viele der Filtereigenschaften (Beugungswirkungsgrad, Selektivität u.a.) hängen unter anderem auch von der Bandpaßcharakteristik, d.h. von denjenigen Raumfrequenzkomponenten ab, die zur Filterbildung beitragen. Zur Ermittlung der dazu beitragenden Raumfrequenzkomponenten verwendeten wir deshalb die in Bild 23 schematisch dargestellte Anordnung.

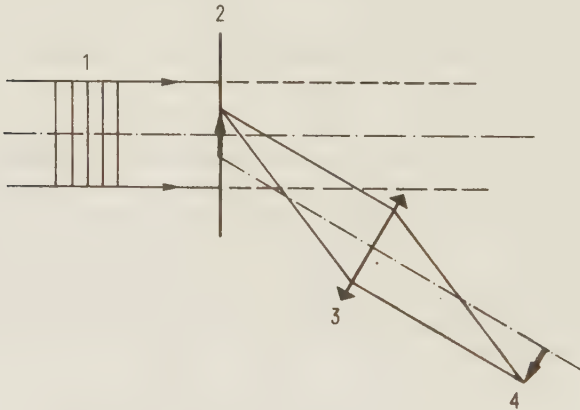


Bild 23. Optische Anordnung zur Abbildung der Filterhologramme. 1 ebene Beleuchtungswelle, 2 Filterhologramm, 3 Abbildungslinse, 4 rekonstruiertes Bild des Filterhologramms

Sie besitzt im Vergleich zu der mikroskopischen Abbildung gewisse Vorteile, weil dadurch die gleichzeitige Abbildung des Filters weitgehend unabhängig von der Filtergröße erfolgen kann. Weiterhin können gleichzeitig mehrere Filter betrachtet werden. Das Filterbild entsteht in der Bildebene 4 (s. Bild 23), wenn das bei Beleuchtung des Filterhologramms 2 (oder der Hologramme) mit einer parallelen Lichtwelle 1 an der Hologrammstruktur gebeugte Licht durch die Abbildungslinse 3 geleitet wird. Es entsteht dort das Filterbild, weil nur an denjenigen Stellen des Filters eine starke Lichtbeugung stattfindet, an denen sich bei der Aufnahme ein Filterhologramm, d.h. (wegen der Interferenz von Objekt- und Referenzwelle) eine Gitterstruktur gebildet hat. Abgebildet werden deshalb nur diejenigen

Raumfrequenzkomponenten, die bei der Filterherstellung das richtige Intensitätsverhältnis zu der Referenzwelle besaßen. Bereiche der RFS.n mit hohen oder niedrigen Intensitäten, wie beispielsweise das zentrale Beugungsbild (größtenteils) und eine große Anzahl der höheren Raumfrequenzkomponenten erscheinen dagegen in der Bildebene nicht, weil die photographische Schicht an diesen Stellen übersteuert bzw. nicht bis zur Empfindlichkeitsschwelle belichtet wird. Durch geeignete Wahl des Intensitätsverhältnisses zwischen RFS und Referenzwelle ist es deshalb möglich, die Bandpaßcharakteristik der Filterhologramme zu beeinflussen. Bis auf die Filteroptimierungsversuche (vgl. 5.1.2) wählten wir die Intensitätsverhältnisse so, daß das informationslose zentrale Beugungsbild, das nur Störsignale liefern kann, die photographische Emulsion übersteuerte. In diesem Fall spricht man bereits von sog. „Hochpaßfiltern“ (bzw. „Hochpaßfilterung“). Filterbilder, die mit einer derartigen Anordnung rekonstruiert wurden, sind in 6.2.1 wiedergegeben.

5.1.2. Quantitative Methoden

Eine Möglichkeit zur quantitativen Messung von Lichtintensitäten ist die bekannte, wohlbewährte und nahezu klassische Methode der photometrischen Registrierung und Auswertung der Schwärzung von Photoplaten, die mit den zu messenden Lichtintensitäten unterhalb der Übersteuerungsschwelle belichtet worden sind. Wir verwendeten diese Methode nur zur Messung der Signalintensitäten, die bei Verwendung von Merkmalfiltern zur Verbesserung der Unterscheidbarkeit der sonst schwer erkennbaren Buchstaben E, F und L bzw. O und Q erhalten wurden /81/. Zur Ermittlung der Signalintensitäten aus der Schwärzung der Photoplaten Agfa Scientia 10 E 75, die auch zur Filterherstellung dienten, benützen wir das Jena-Photometer (Nr.237615).

Einfacher und vor allem im Direktzeitverfahren (ohne den zeitaufwendigen photographischen Prozeß) war jedoch die

Abtastung des Intensitätsprofils der Korrelationssignale und in manchen Fällen (vgl. 6.2.1) auch der Raumfrequenzkomponenten mit dem Scanning Photometer der Fa. Gamma Scientific (Modell 2400). Es besitzt eine Glasfaser (Durchmesser: 150 μm), die das Lichtsignal in einen Photovervielfacher leitet; sie kann in der einen Richtung der Detektorebene motorisch und in der anderen Richtung manuell (mit Hilfe einer Mikrometerschraube) bewegt werden. Das am Vervielfacher erzeugte Stromsignal wird verstärkt und anschließend zur digitalen Anzeige des Intensitätswertes an das dazugehörige Anzeigegerät geleitet. Ein zusätzlicher Ausgang am Anzeigegerät ermöglicht weiterhin die Registrierung der Signalintensitäten mit einem Koordinatenschreiber. Die Registrierung der Intensitäten der Raumfrequenzkomponenten geschah direkt in der Filterebene des Korrelationssystems (Bild 4).

Die eingangs erwähnte Methode mit Hilfe eines Fernsehsystems (vgl. 5.1.1) verwendeten wir nur in der ersten Phase unserer experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Winkelabhängigkeit des Korrelationsprozesses am Beispiel eines Fingerabdruckes; vgl. 6.1.2.2.2. Im Vergleich zu der zuletzt beschriebenen Methode (mit dem Scanning Photometer) ist jedoch dieses Verfahren ungenauer, weil, wie wir sehen werden, ein Teil des Vergleiches visuell und deshalb subjektiv erfolgen mußte. Da der dazugehörige experimentelle Aufbau im Prinzip mit dem in Bild 4 schematisch wiedergegebenen weitgehend identisch ist, wird hier auf eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Komponenten verzichtet. Die Signalintensitäten wurden auf folgende Weise gemessen (vgl. auch /68/): Das in Abhängigkeit von der Winkellage des Fingerabdruckes (oder auch jedes anderen Zeichens) jeweils rekonstruierte Korrelationssignal wurde mit der Abbildungslinse (Bild 4) auf die Detektorebene der Fernsehkamera (Vidikon) fokussiert und auf dem Fernsehschirm wiedergegeben. Bei unveränderter Helligkeit des Fernsehschirmes kann man nun mit Hilfe des kontinuierlich verstellbaren Strahlteilers die Intensität der Objektwelle und damit die Intensität des betrachteten Korrelations-

signales soweit abschwächen oder verstärken, daß sie auf dem Schirm gerade noch erkennbar ist. Die Intensitätsänderung der Objektwelle bewirkt aber gleichzeitig eine entsprechende Verstärkung bzw. Abschwächung des Referenzstrahles, so daß diese Intensitätsänderung der Referenzwelle als Maß für den Korrelationsgrad des zu vergleichenden Zeichens verwendet werden kann. Die Intensitätsänderungen der mit 1 kHz zerhackten Referenzwelle (die nur bei der Filterherstellung erforderlich ist) wurden mit einem Si-Photodetektor registriert und auf einem Oszillographenschirm betrachtet.

5.2. Optimierung und Reproduzierbarkeit der Filterhologramme mit dazugehörigen experimentellen Ergebnissen

Die Güte der Filterhologramme wird hauptsächlich vom Wirkungsgrad, vom Signal-Rausch-Verhältnis¹⁾ und von der Filterselektivität bestimmt. Hologramme besitzen im allgemeinen einen hohen Wirkungsgrad, wenn bei der Belichtung der Photoplatten unter anderem auch dafür gesorgt wird (vgl. /69/), daß die Intensitäten der Referenz- und Objektwelle über die ganze Hologrammfläche den gleichen Wert haben. Bessere Signal-Rausch-Verhältnisse (bzw. im allgemeinen Fall bessere Bild-Störlicht-Verhältnisse) können dagegen erzielt werden, wenn das Verhältnis von Referenz-zur Objektwelle ca. 4 : 1 beträgt. Gute Selektivität setzt schließlich Filter voraus /95/, die möglichst nur höhere Raumfrequenzkomponenten enthalten. Die Realisierung derartiger Filter ist jedoch problematisch /116/. Die gleichzeitige Erfüllung dieser Forderungen ist in der holographischen Zeichenerkennung (zumindest mit vertretbarem Aufwand) nicht möglich, weil erstens die Intensitäten der Raumfrequenzkomponenten in der Filterebene extrem unterschiedliche Werte besitzen und zweitens (wegen der sonst schlechteren Selektivität) ihre vollkommene Registrierung nicht immer wünschenswert ist. Die Intensitätsverteilung in der Raumfrequenzebene hängt außerdem von der beugungswirksamen Feinstruktur und von der geometrischen Form der Zeichen (vgl. 6.2.1 bzw. 3.1.1) sowie von der Beleuchtungsintensität ab. Da die Objekte, die wir für die Durchführung unserer Versuche ausgewählt

¹⁾ Als Rauschen wird hier in erster Linie das von der Photoschicht erzeugte Streulicht verstanden.

haber (das sind 1) zeichnerisch, mit Schnelldruckern und mit Schreibmaschinen hergestellte alphanumerische Zeichen und 2) Fingerabdrücke), sowohl in der Struktur der beugenden Kanten als auch in der geometrischen Form sehr unterschiedlich sind, müßten von Fall zu Fall neue Optimierungsversuche durchgeführt werden. Weitere Parameter, die größtenteils nicht nur die Qualität, sondern auch die Reproduzierbarkeit der Filterhologramme sehr stark beeinflussen können, sind 1) die Kohärenzlänge, die Kohärenzstabilität und der Polarisationszustand des Lasers, 2) die Belichtungszeit (bzw. Belichtungsenergie), die Qualität und die chemischen Bearbeitungsverfahren der photographischen Speichermaterialien, 3) die Erschütterungsempfindlichkeit der Apparatur, 4) die Luftstabilität im Strahlengang, u.a.m. .

Zur Demonstration derartiger Einflüsse auf die Auto- und Kreuzkorrelationssignale und damit auch auf die Bandpaßcharakteristik der Filterhologramme wird im folgenden eine Auswahl von experimentellen Ergebnissen diskutiert, die in zwei Versuchsreihen bei Variation 1) der Belichtungszeit und 2) des Verhältnisses von Referenz- zur Objektwelle erhalten wurden. In der ersten Versuchsreihe verwendeten wir als Versuchszeichen die Ziffer 2 einer Schreibmaschine (Adler electric 151f) und in der zweiten eine Ziffer der gleichen Klasse, die für diesen Fall zuerst im Großformat gezeichnet und anschließend photographisch in Normalgröße verkleinert wurde. Es wurden diese beiden Variationen und Zeichenqualitäten gewählt, weil sie extrem unterschiedliche Intensitäten der Raumfrequenzkomponenten zur Folge haben und die hier betrachteten Einflüsse besonders stark verdeutlichen. Beide Zeichen lagen in negativer Form vor (weiß auf schwarzem Untergrund); als Trägermaterialien dienten im ersten Fall Film und im zweiten eine Photoplatte (Glas).

Die experimentellen Ergebnisse der ersten Versuchsreihe und die dazugehörigen Versuchsparameter sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Aufnahmebedingungen und Signalintensitäten zur Filteroptimierung mit Ziffern einer Schreibmaschine.

Filter Nr.	Bel. Zeit (sec)	Lichtleistung d. Obj. Welle (μW)	Lichtleistung d. Ref. Welle (μW)	Autokorr.- Intens. (rel.)	Kreuzkorrelationsintens. (rel.) der Ziffern								
					0	1	3	4	5	6	7	8	9
1	$\frac{1}{15}$	1.78	0.47	67	187	804	187	229	147	462	208	295	543
2	$\frac{1}{6}$	1.78	0.46	66	41	10	19	21	15	56	16	49	24
3	$\frac{1}{4}$	1.78	0.42	103	66	15	36	37	27	70	15	62	76
4	$\frac{1}{15}$	1.54	0.76	146	99	15	42	53	38	115	38	42	93
5	$\frac{1}{6}$	1.54	0.82	119	86	67	67	15	49	54	33	49	91
6	$\frac{1}{4}$	1.54	0.92	167	67	32	90	67	80	146	41	108	108
7	$\frac{1}{15}$	1.24	1.61	43	114	37	27	47	30	45	35	80	43
8	$\frac{1}{6}$	1.24	1.91	285	137	51	162	123	105	162	43	137	221
9	$\frac{1}{4}$	1.24	2.85	406	175	57	240	77	28	304	65	97	114
10	$\frac{1}{15}$	0.97	3.50	460	313	46	129	166	97	147	106	202	184
11	$\frac{1}{6}$	0.97	3.83	650	396	84	396	136	370	474	123	104	416
12	$\frac{1}{4}$	0.97	3.88	140	81	18	92	29	87	101	22	27	109
13	$\frac{1}{15}$	0.64	4.80	1145	802	126	630	252	704	607	160	160	744
14	$\frac{1}{6}$	0.64	4.47	810	583	138	49	170	583	656	113	138	729
15	$\frac{1}{4}$	0.64	4.00	176	107	39	100	30	116	147	35	32	153
16	$\frac{1}{15}$	0.41	4.02	940	193	208	413	242	620	508	487	835	426
17	$\frac{1}{6}$	0.41	3.45	1550	1038	139	279	434	110	116	635	1240	1131
18	$\frac{1}{4}$	0.41	2.95	637	439	121	439	166	490	510	89	427	490
Lichtleistung des jeweiligen RFS.S (μW)				2,15	2,32	1,48	2,40	2,00	2,40	2,96	2,2	2,87	2,70

Eingetragen sind in der ersten Spalte die Filternumerierung (willkürlich), in den drei nächsten Spalten die Belichtungszeit und die Lichtleistung der Objekt- bzw. Referenzwelle (gemessen in der Filterebene), in der fünften die Intensitäten der Autokorrelationssignale und in den übrigen die Intensitäten der Kreuzkorrelationssignale¹⁾ der restlichen neun Ziffern aus der gleichen Schreibmaschine. Die unterste Zeile der Tabelle 2 enthält schließlich die gesamte Lichtleistung derjenigen Raumfrequenzkomponenten, die zur Ansteuerung der Filterplatte zur Verfügung stand.

Die unterschiedlichen Leistungswerte der RFS.n sind hauptsächlich auf die Intensitätsunterschiede des zentralen Beugungsbildes zurückzuführen. Sein Störbeitrag zu dem gesamten Korrelationssignal ist deshalb (vor allem bei Tiefpaßfiltern) von Zeichen zu Zeichen entsprechend unterschiedlich. Die Schwankungen der Leistungswerte der Referenzwellen jeweils bei den gewählten Belichtungszeiten $1/4s$, $1/8s$ u. $1/16s$ treten dagegen auf, weil es in der Praxis nicht leicht ist, über die ganze Ringzone, auf der die Filter hergestellt werden, konstante Intensitäten einzustellen. Speziell für die hier behandelten Versuchsreihen sind außerdem solche Schwankungen erwünscht, weil es sich auch um die Ermittlung des optimalen Verhältnisses von Referenz- zur Objektwelle gehandelt hat. Der Vergleich der Absolutwerte der Signalintensitäten zeigt, daß sie sowohl von den Verhältnissen der Referenz- zur Objektwelle als auch von der Belichtungszeit abhängig sind.

Aufschlußreicher ist jedoch die graphische Darstellung (Bild 24) der Intensitätsverhältnisse von Kreuz- zu Autokorrelationssignalen für sämtliche Ziffernkombinationen, weil daraus vor

¹⁾ Die Intensitäten der Auto- und Kreuzkorrelationssignale wurden am Anzeigegerät des Scanning-Photometers (vgl. 6.1.2) abgelesen. Zur Messung der Lichtleistungen der RFS.n und der Referenzwellen diente dagegen ein Leistungsmesser direkt hinter der Lochblende, die zur Begrenzung der Referenzwelle diente (vgl. 4.3.6.2).

allem wichtige Aussagen über die Filterselektivität gewonnen werden können.

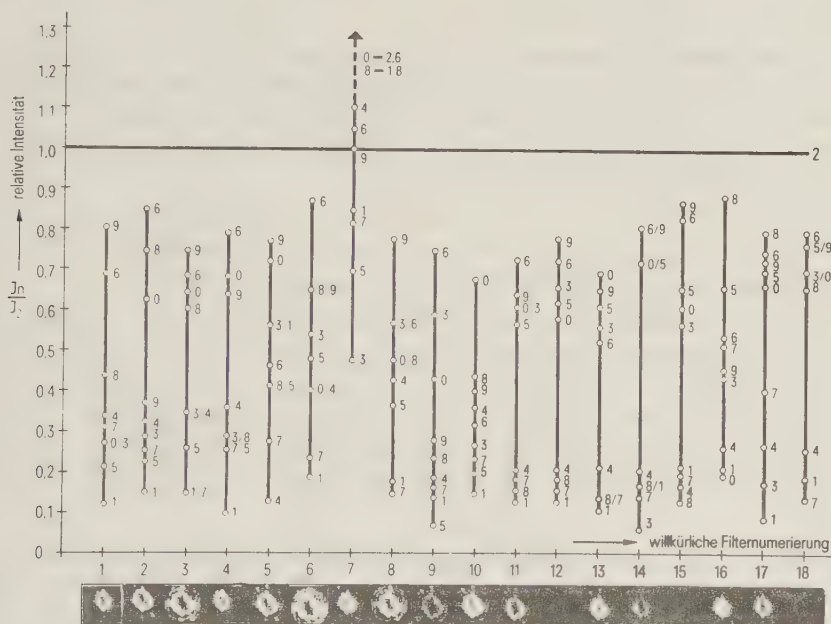


Bild 24. Graphische Darstellung der Kreuz-Autokorrelations-signal-Verhältnisse, die aus den Signalintensitäten der Tabelle 2 berechnet wurden, sowie Bildaufnahmen der dazugehörigen Filterhologramme

Eingetragen sind als Abzisse die Nummer der Filter und als Ordinate das Verhältnis I_n ($n = \text{Ziffern } 0 \text{ bis } 9, \text{ außer } 2$) zu den gemessenen Signalintensitäten I_2 bei Ansteuerung der Filter mit der Ziffer 2. Die auf diese Weise auf eins normierten Intensitätswerte der Autokorrelationssignale der Ziffer 2 sind durch die dicke waagrechte Linie verbunden und die Verhältnisse

I_n/I_2 jeweils durch Punkte gekennzeichnet, die durch senkrechte Linien verbunden sind. Neben jedem Punkt ist die dazugehörige Ziffer eingetragen und unterhalb jedes Filters das nach der in Bild 23 dargestellten Anordnung rekonstruierte Filterbild wiedergegeben.

Aus dem Vergleich einerseits der gemessenen Intensitätswerte und der daraus berechneten Intensitätsverhältnisse und andererseits der Filteraufnahmen mit den Herstellungsbedingungen der Filter lassen sich folgende allgemeine Feststellungen ableiten (s. Tabelle 2 und Bild 24):

- 1) Die absolute Intensität der Autokorrelationssignale steigt innerhalb der betrachteten Grenze
 - a) mit zunehmender Leistung der Referenzwelle und
 - b) mit sinkender Leistung des RFS.s an¹⁾.
 - 2) Die beste Erkennbarkeit, d.h. der größte Abstand zwischen Kreuz- und Autokorrelationssignalen, tritt bei der Belichtungszeit von 1/15s (Bild 24, Filter Nr. 13) auf.
 - 3) Höhere Absolutsignalintensitäten erfordern dagegen längere Belichtungszeiten (vgl. z.B. Filter Nr. 17).
 - 4) Die Aufnahmebedingungen können so ungünstig sein, daß die Intensitäten von Kreuzkorrelationssignalen höher sind als die der Autokorrelationssignale (Filter Nr. 7).
 - 5) Ziffern mit geringem Ähnlichkeitsgrad zu der Vergleichsziffer 2, wie z.B. 1, 4 und 7, besitzen im allgemeinen (erwartungsgemäß) günstigere Signalverhältnisse als die übrigen Ziffern.
-
- ¹⁾ Es sei darauf hingewiesen, daß sowohl die Leistung der Referenzwelle als auch die des RFS.s hier relativ zu betrachten sind, weil sie hinter der oben erwähnten Lochblende gemessen wurden und deshalb keine Aussagen über die tatsächlichen und nicht leicht erfaßbaren Intensitätsverhältnisse liefern, die an den effektiven Filterstellen herrschen.

6) Die Bandpaßcharakteristik der Filter (vgl. Aufnahmen von Bild 24) wird sowohl vom Leistungsverhältnis der beiden Lichtwellen als auch von der Belichtungszeit beeinflusst.

Zu wichtigen Schlußfolgerungen führt weiterhin der Vergleich der bisher diskutierten Ergebnisse der ersten Versuchsreihe mit denen der zweiten Versuchsreihe, die mit den zeichnerisch hergestellten Ziffern erhalten wurden und in gleicher Weise in der Tabelle 3 und im Bild 25 wiedergegeben bzw. graphisch dargestellt sind.

Tabelle 3: Aufnahmebedingungen und Signalintensitäten zur Filteroptimierung mit zeichnerisch hergestellten Ziffern

Filter Nr.	Bel Zeit (sec)	Lichtleistung d. Obj. Welle (μW)	Lichtleistung d. Ref. Welle (μW)	Autokorr.- Intens. (rel.)	Kreuzkorrelationsintens. (rel.) der Ziffern								
					0	1	3	4	5	6	7	8	9
1	$\frac{1}{15}$	0,72	0,64	170	140	65	125	120	140	135	90	150	140
2	$\frac{1}{6}$	0,72	0,63	240	135	55	125	95	160	135	90	145	160
3	$\frac{1}{4}$	0,72	0,60	270	160	112	265	160	214	198	192	235	212
4	$\frac{1}{15}$	0,62	1,12	340	255	110	220	195	185	225	150	245	280
5	$\frac{1}{6}$	0,62	1,17	530	360	170	360	310	385	340	235	380	420
6	$\frac{1}{4}$	0,62	1,25	1245	790	255	460	390	510	540	430	630	950
7	$\frac{1}{15}$	0,50	2,10	820	470	180	370	330	410	400	275	415	520
8	$\frac{1}{6}$	0,50	2,25	1420	860	295	640	570	715	670	510	780	1035
9	$\frac{1}{4}$	0,50	2,40	1735	920	340	420	525	840	890	640	940	1115
10	$\frac{1}{15}$	0,40	3,40	1235	685	210	580	485	550	525	490	425	610
11	$\frac{1}{6}$	0,40	3,55	2050	970	320	980	610	740	690	710	835	1120
12	$\frac{1}{4}$	0,40	3,55	970	460	175	520	270	375	360	335	430	520
13	$\frac{1}{15}$	0,28	4,40	1360	745	230	540	595	530	470	520	555	840
14	$\frac{1}{6}$	0,28	4,15	2040	999	340	1170	610	710	620	770	785	1140
15	$\frac{1}{4}$	0,28	3,90	870	415	140	520	230	340	320	340	355	540
16	$\frac{1}{15}$	0,16	4,10	1280	905	220	870	760	650	620	535	670	835
17	$\frac{1}{6}$	0,16	3,90	1920	970	300	1140	720	710	670	780	840	1080
18	$\frac{1}{4}$	0,16	3,60	1270	560	213	760	425	545	480	540	590	625
Lichtleistung des jeweiligen RFS.S (μW)				0,67	0,71	0,38	0,72	0,81	0,75	0,77	0,53	0,86	0,77

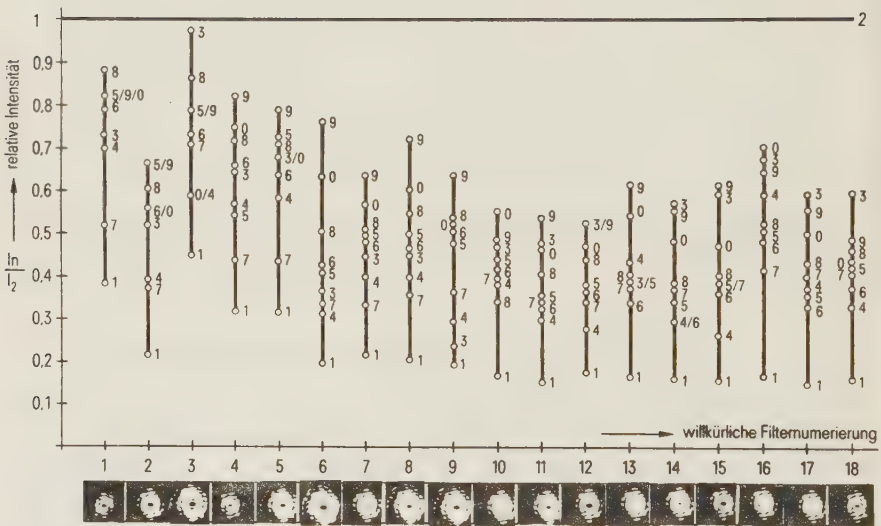


Bild 25. Graphische Darstellung der Kreuz-Autokorrelations-signal-Verhältnisse, die aus den Signalintensitäten der Tabelle 3 berechnet wurden, sowie Bildaufnahmen der dazugehörigen Filterhologramme

Aus diesem Vergleich geht deutlich hervor, daß im zweiten Fall sowohl die Verhältnisse von Auto- zu Kreuzkorrelationssignalen günstiger sind als auch die Streuung der Korrelationssignale unter den einzelnen Filtern nicht mehr so stark in Erscheinung tritt.

Dies ist besonders beim Vergleich der Signalverhältnisse der Ziffern 1, 4 und 7 zu erkennen, die wegen des geringen Ähnlichkeitsgrades zu der Vergleichsziffer 2 niedrigere Signalverhältnisse als die übrigen Ziffern besitzen (Bild 25). Etwas niedrigere Signalverhältnisse als erwartet besitzen dagegen die Ziffern 3 und 5, die zum überwiegenden Teil die gleiche Form (Information) haben, wie die Vergleichsziffer 2. Dieses Verhalten der Signalverhältnisse läßt sich jedoch durch genaue Betrachtung der im Bild 25 wiedergegebenen Filteraufnahmen erklären. Daraus geht hervor, daß nur die Information der runden Anteile der Ziffer 2, die auch überwiegen, zur Filterbildung beigetragen haben. Es ist also zu folgern, daß bei der Filteransteuerung mit den RFS.n der Ziffern 3 und 5 die geraden Anteile beider Ziffern keinen Beitrag zu den Signalintensitäten lieferten. Die holographische Nichtregistrierung der Information der geradlinigen Anteile der Ziffer 2 liegt offensichtlich daran, daß die Intensität derjenigen Raumfrequenzkomponenten, die die Information dieser Anteile enthielten, unterhalb der Schwelle lag, die zur Schwärzung der photographischen Schicht notwendig wäre.

Sowohl im Hinblick auf hohe Absolutsignalintensitäten als auch auf bessere Auto-Kreuzkorrelationssignal-Verhältnisse sind also in diesem Fall die Filter mit den Nummern 4 und 14 und die Belichtungszeit von $1/8$ s als optimal zu betrachten. Die relativ großen Unterschiede zwischen den Meßergebnissen beider Versuchsreihen sind deshalb hauptsächlich auf die Qualitätsunterschiede der beugungswirksamen Randstrukturen beider Zifferngruppen zurückzuführen; vgl. auch 6.2.1.

Tabelle 4 enthält schließlich die Intensitätswerte von 10 Autokorrelationssignalen, die bei Ansteuerung einer entsprechend großen Anzahl von unter gleichen Bedingungen aufgenommenen und entwickelten Filterhologrammen gemessen wurden.

Tabelle 4: Intensitätswerte von 10 Autokorrelationssignalen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Filter-Qualität

Filter Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Signalintens. (rel)	1820	1440	1975	1528	2130	1780	2190	1435	1890

Die Intensitätsabweichungen vom Mittelwert betragen demnach bis ca. $\pm 20\%$ und sind größtenteils auf die am Anfang dieses Abschnitts erwähnten Störquellen zurückzuführen. Derartige Abweichungen sind in labormäßigen Aufbauten durchaus vertretbar. Sie müssen jedoch in der Praxis vermieden werden, weil sonst, z.B. beim Wechseln vom Filtersätzen, schwierige Normierungsarbeiten an den entsprechenden Einheiten der Auswerteelektronik notwendig sind.

6. Experimentelle Ergebnisse und ihre Diskussion

6.1. Amplituden- und holographische Filtermethoden

6.1.1. Erkennung von Fehlern an Photomasken durch Amplitudenfilterung in der Raumfrequenzebene

Das Verfahren der kohärentoptischen Amplitudenfilterung zur Erkennung von Fehlstellen an Photomasken, die zur Herstellung von integrierten Halbleiterschaltkreisen verwendet werden /96/, stellt einen Spezialfall derartiger Filtermethoden dar und beruht, wie Watkins /33/ 1969 als erster berichtet hat, in erster Linie auf der strengen Periodizität, die die Abstände zwischen den einzelnen Photomaskenelementen kennzeichnet; vgl. Bild 26 und /33/. Fehlstellen sind dagegen statistisch verteilt, weil sie rein zufällig entstehen. Auch die geometrische Form der Sollstrukturen, die im Gegensatz zu den Fehlstellen nur durch gerade Randlinien begrenzt werden, kommt diesem Maskenprüfverfahren im besonderen Maße zugute, weil die Filter aus einer fehlerfreien Photomaske mit rechteckiger Elementenstruktur hergestellt werden. Sie können deshalb, wie wir sehen werden, die Fehlerinformation nur geringfügig sperren.

Die Erkennung von Maskenfehlern mit tragbarem Aufwand wird in der Halbleitertechnik mit großem Interesse verfolgt, weil sie zur rechtzeitigen Ausscheidung fehlerhafter Masken aus

dem Produktionsprozeß und damit zur Steigerung der Ausbeute führt. Die Fehler, die zu Kurzschlüssen und Stromunterbrechungen führen, entstehen zum großen Teil während des Produktionsprozesses bei der Kontaktkopie der Maske mit dem Halbleiterscheibchen. Nach 10- bis 15-maliger Verwendung werden deshalb gewöhnlich sämtliche Photomasken, deren Erzeugung kostspielig ist, aus dem Produktionsprozeß ausgeschieden. Zu Störungen führen außerdem auch Fehler, die von Staubkörnern herrühren oder aus fehlerhaften Photoemulsionen stammen. Sie haben im Vergleich zu den Fehlern der ersten Art eine relativ kleinere Fläche (ca. $1/\mu\text{m}^2$ - $2/\mu\text{m}^2$) und sind deshalb sowohl mit den üblichen und aufwendigen Prüfmethoden (visuelle Betrachtung im Mikroskop) als auch mit dem hier beschriebenen kohärentoptischen Verfahren sehr schwer zu erkennen.

Nach einer kurzen Erläuterung des kohärentoptischen Verfahrens wird im folgenden hauptsächlich über eigene experimentelle Ergebnisse berichtet, die mit einer nach der im Bild 1 schematisch dargestellten Anordnung erhalten wurden. Weiterhin werden dazugehörige Probleme aufgezeigt¹⁾.

Durch die kohärente Beleuchtung einer fehlerfreien Photomaske (Bild 26) mit einer ebenen Lichtwelle entsteht bekanntlich (vgl. 3.1) in der hinteren Brennebene der Sammellinse das RFS der Sollstrukturen der Maske, das (wegen der rechteckigen Form der einzelnen Strukturen) im wesentlichen die Form eines Kreuzes hat; vgl. auch /33/. Die Unterteilung der einzelnen Raumfrequenzkomponenten (die bei Beleuchtung einer einzelnen Struktur entstehen würden) und der definierte Abstand der dadurch entstandenen Intensitätsmaxima sind nach Watkins /33/ auf die strenge Periodizität der Strukturen²⁾ zurückzuführen. Belichtet man nun eine Photoplatte mit der Lichtverteilung dieses RFS.s, so wirkt sie (nach Entwicklung und Justierung an derselben Stelle) als Lichtsperre nur für das Licht, das an den

1) Die hier behandelten Ergebnisse sind als Beitrag des Verfassers dieser Arbeit auch in /34,35/ veröffentlicht bzw. vorgetragen worden.

2) Im Bild (links) sind in ihrer vollen Fläche nur 20 derartige Strukturen abgebildet; jede Struktur entspricht praktisch einem Schaltkreis.

Sollstrukturen der Photomaske gebeugt wird. Licht dagegen, das bei fehlerhaften Masken an den Fehlerstellen gebeugt wird, passiert (bei passenden Blendenzahlen der Linsensysteme) zum großen Teil unbehindert das Filter und gelangt über die zweite Linse in die Bildebene, weil die Fehler 1) unperiodisch auftreten und 2) meistens eine runde Fläche besitzen. Bei günstigen Filtereigenschaften und z.B. bei passender Regelung der Helligkeit eines Fernsehschirmes kann man also über eine Fernsehkamera, die sich in der Bildebene befindet, die Photomaske auf Fehler untersuchen. Eine weitere Möglichkeit zur Auswertung der Maskeninformation in der Bildebene besteht in der elektronischen Verarbeitung des Videosignals; vgl. /90/.

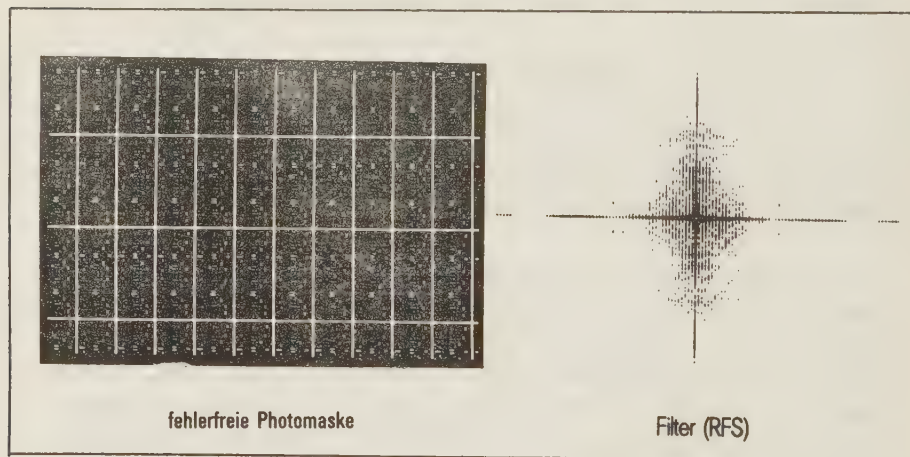


Bild 26. Fehlerfreie Photomaske zur Erzeugung des Filters (rechts)

Die extrem starken Intensitätsunterschiede, die im RFS auch innerhalb jeder Raumfrequenzkomponente herrschen, haben in der Praxis zur Folge, daß die Filter in der gewöhnlichen Form keine optimale Sperr- bzw. Durchlaßeigenschaften besitzen,

weil einerseits die niedrigen und intensitätsstärkeren Raumfrequenzkomponenten zur leichten Übersteuerung der photographischen Schicht und zur Bildung von sog. Lichthöfen führen und andererseits die höheren (wegen der relativ niedrigeren Intensitäten) nicht gleichzeitig registriert werden können. Zur Optimierung der Filtereigenschaften haben wir deshalb eine Kombination aus zwei Filtern verwendet, die nach folgendem Verfahren hergestellt wurden:

Bei der Herstellung des ersten Filters wurde die Belichtungszeit so kurz gewählt, daß nur die niedrigen und intensitätsstarken Raumfrequenzkomponenten die Photoplatte schwärzen konnten. Diese diente anschließend als Lichtabschwächer der niedrigen Raumfrequenzkomponenten bei der Belichtung einer zweiten Photoplatte mit den höheren Komponenten. Beim Filterprozeß wurden beide Filter mit möglichst minimalem Abstand zueinander in der Filterebene angebracht und optimal justiert. Das erste Filter wirkt also als „Hochpaßfilter“, das zweite als „Tiefpaßfilter“ und die Kombination beider als „Optimalfilter“ zur besseren Unterdrückung der Sollstruktur bzw. zum günstigeren Durchlaß der Fehlerinformationen der Prüfmasken. Das in Bild 26 abgebildete RFS ist beispielsweise eine Kopie eines Tiefpaßfilters des zentralen Beugungsbildes.

Wir verwendeten eine derartige Filterkombination in einer optischen Anordnung nach Bild 1 zur Durchführung von prinzipiellen Untersuchungen. Als Versuchsmasken dienten hauptsächlich Masken des in Bild 26 wiedergegebenen Typs. Die einzelnen Bereiche (Schaltkreise), die jeweils ca. 80 Elemente enthalten und im Repeater-Verfahren hergestellt waren /96/, besaßen im Original eine Fläche von 1,2 mm x 2,9 mm.

Bild 27 zeigt zwei verschiedene Fehlerarten, die in der Praxis häufig vorkommen und sich kohärentoptisch (vor allem wegen ihrer Größe und Art) sehr stark von der Sollstruktur abheben. Die beiden linken Aufnahmen zeigen die untersuchten fehlerhaften Maskenbereiche bei normaler mikroskopischer Beobachtung

und die rechten die nach dem Filterprozeß vom Fernsehschirm photographierten fehlerhaften Stellen. In Bild 27a) rechts ist (im Gegensatz zur linken Aufnahme) hauptsächlich nur die Spur des Kratzers erkennbar.

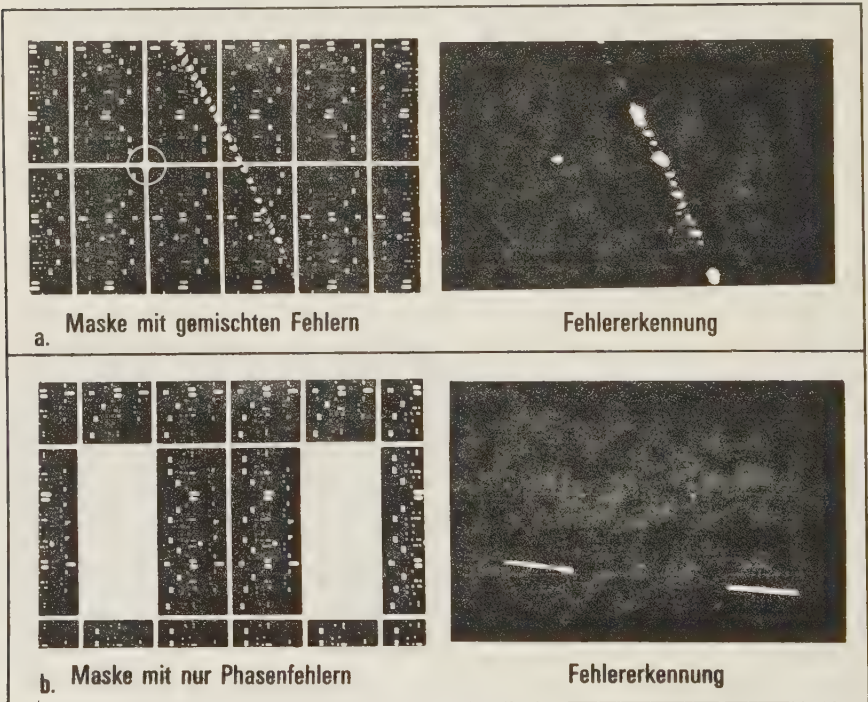


Bild 27. Erkennung von zwei verschiedenartigen Fehlerarten durch kohärentoptische Amplitudenfilterung

Es handelt sich dabei um Stellen, die gleichzeitig sowohl Amplituden- als auch Phasenfehleranteile enthalten, denn außer der Schwärzung (Amplitude) ist auch die Gelatinedicke ungleichmäßig verändert worden, die eine Phasenänderung und infolgedessen - genauso wie der Amplitudenfehler - einen Beugungseffekt hervorruft. Der links neben dem Spurfehler

ebenfalls sehr stark in Erscheinung tretende Fehler ist dagegen - in Übereinstimmung mit genauen mikroskopischen Betrachtungen der entsprechenden Stellen der Photomaske (eingekreister Bereich) - ein reiner Amplitudenfehler, der auf die unscharf ausgebildeten Ecken der Photomasken zurückzuführen ist. Bild 27b) (rechts) zeigt schließlich zwei reine Phasenfehler, die bei der gewöhnlichen mikroskopischen Aufnahme (d.h. ohne Interferenz- oder Phasenkontrastverfahren) wegen ihrer Natur als Dickenschwankungen des Trägerglases nicht sichtbar sind. Die Erkennung derartiger Fehler ist jedoch nicht erforderlich, weil sie nur aus ohnehin transparenten Stellen der Photomasken stammen können. Da sie also einerseits weder zu Kurzschlüssen noch zu Stromunterbrechungen führen können und sich andererseits grundsätzlich nicht von den tatsächlich störenden Amplituden oder Amplituden-Phasenfehlern unterscheiden, könnten sie deshalb (vor allem bei automatischer Auswertung der Fehlerintensität) zu vorzeitiger Ausscheidung von noch brauchbaren Photomasken aus dem Produktionsprozeß führen. Phasenfehler erscheinen außerdem in der Bildebene viel intensiver als die Amplitudenfehler, weil erstere bei sonst gleichen Bedingungen höhere Beugungswirkungsgrade, d.h. intensitätsstärkere Raumfrequenzkomponenten liefern; vgl. auch 6.2.3. Beim häufigeren Auftreten von reinen Phasenfehlern wäre es deshalb sinnvoller, auf die volle Automatisierung des Fehlererkennungsprozesses zu verzichten und die Auswertung des Fehlerbildfeldes (z.B. auf einem Fernsehschirm) einer erfahrenen Person zu überlassen, die die Photomaskenstruktur kennt und damit auch die Fehlerarten leicht unterscheiden kann.

Gravierender sind jedoch folgende grundsätzliche Probleme, die mit den hohen in der Praxis gestellten Forderungen zusammenhängen. Die Größe der vom System noch zu erkennenden Fehler hängt in erster Linie von den Blendenzahlen (Brennweite / Apertur) beider Linsen ab; vgl. auch Bild 1 sowie /34/. Zur Erkennung von Fehlern mit Durchmessern im Mikrometerbereich (wie es in der Praxis gefordert wird) sind jedoch sehr niedrige Blendenzahlen notwendig, die nur mit einem sehr hohen Aufwand realisiert werden können. Um dieses Problem zu umgehen, haben

Beadles u. Breen /97/ die getrennte Prüfung jedes einzelnen Schaltkreises vorgeschlagen. Auch dieser Vorschlag dürfte nicht zu brauchbaren Ergebnissen geführt haben, weil die durch diese Methode noch erkennbaren Fehler relativ groß sind. Eine bessere Fehlererkennbarkeit eines Systems kann außerdem auch bei Verwendung von kurzwelligeren Lichtquellen erreicht werden. H.P.Kraft /34/ konnte mit der Wellenlänge $0,488\mu\text{m}$ eines Argonlasers und mit konventionellen Linsensystemen noch Fehler mit Durchmessern von ca. $4\mu\text{m}$ erkennen. Mit den von uns verwendeten Linsensystemen (Tele-Xenar 1 : 5,5/500 und Heliar 1 : 4,5/240) und der Wellenlänge des He-Ne-Lasers ($0,6328\mu\text{m}$) wurden Fehler bis ca. $7\mu\text{m}$ aufgelöst.

6.1.2. Zeichenerkennung durch einfache holographische Filterung

6.1.2.1. Beispiel zur Erkennung alphanumerischer Zeichen

Die holographische Erkennung alphanumerischer Zeichen (der Ziffern 0 bis 9, sämtlicher Buchstaben des Alphabetes und einiger Sonderzeichen (vgl. Bild 43)) gehört zu den ersten Vorschlägen über praktische Anwendungen des holographischen Prinzips und war von Anfang an der Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten vieler wissenschaftlicher Gruppen in der ganzen Welt /14-19,93/. Das große Interesse beruht darauf, daß das holographische Verfahren prinzipielle Vorteile zur Realisierung von einfachen, billigen und leistungsfähigen Lesesystemen besitzt. Aus vielen Gründen, die zum großen Teil auch in dieser Arbeit ausführlicher diskutiert werden, konnten jedoch diese Vorteile bisher nicht in der Praxis ausgenutzt werden.

Obwohl die holographische Filterung in dieser einfachen Form (mit nur einem einzigen Filter) für die Erkennung sämtlicher in Frage kommender alphanumerischer Zeichenklassen unzureichend ist (vgl. 4.2.1), soll im folgenden anhand eines einfachen Beispiels derartiger Filterung vor allem die Signalverteilung demonstriert werden, die bei paralleler Beleuchtung mehrerer Zeichen (ebenfalls parallel) in der Detektorebene entsteht.

Es handelt sich also hier mehr um eine reelle Demonstration der Eigenschaft der „parallelen“ Informationsverarbeitung holographischer Systeme und darüber hinaus um einen Beitrag zum Verständnis der in den folgenden Abschnitten behandelten und etwas komplizierteren Signalverteilungen. Als experimenteller Aufbau diente die in Bild 4 schematisch dargestellte Anordnung und als Zeichenfeld die im Bild 28 wiedergegebenen Ziffern.

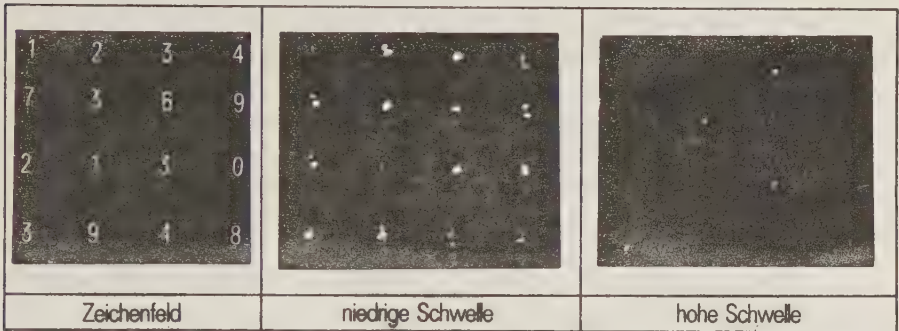


Bild 28. Demonstrationsbeispiel paralleler Zeichenerkennung mit einem holographischen Filter für die Ziffer 3

Bei Ansteuerung beispielsweise nur des Filters für die Ziffer 3 mit dem RFS des gesamten Ziffernfeldes entsteht in der Signalebene die Signalverteilung, die für zwei Schwellen der Helligkeit des Fernsehschirmes (vgl. 5.1.1) in den beiden nächsten Aufnahmen (Bild 28) wiedergegeben ist. Diese Signalverteilung entspricht der Verteilung des Ziffernfeldes, das parallel beleuchtet wird, weil jede Ziffer (oder allgemein Zeichen) ein Korrelationssignal erzeugt. Wichtig ist jedoch nicht nur das parallele Erscheinen der Signale für jedes Zeichen, sondern auch deren Intensitätsunterschied, der z.B. durch Erhöhung der Schwelle festgestellt werden kann (vgl. rechte Aufnahme). Am intensivsten erscheinen deshalb erwartungsgemäß nur die Signale der viermal auftretenden Ziffern der Zeichenklasse 3, d.h. die Autokorrelationssignale. Die Intensität der übrigen Signale hängt in erster Linie vom Ähnlichkeitsgrad der dazugehörigen Ziffern zur Ziffer 3 und von den Filtereigenschaften ab.

6.1.2.2. Identifizierung von Fingerabdrücken

Da bei der Identifizierung von Fingerabdrücken prinzipiell nur ein Filter, beispielsweise das einer Tatortspur oder des Abdruckes einer gesuchten Person, mit sämtlichen in der Fingerabdrucksammlung vorhandenen Abdrücken verglichen werden muß (vgl. /20-23,98/), würde zum Identifizierungsprozeß die im letzten Abschnitt diskutierte einfache holographische Filterung ausreichen. Die hier behandelten experimentellen Ergebnisse werden jedoch deutlich zeigen, daß die im Realfall auftretenden Probleme zumindestens eine direkte Fingerabdruckidentifizierung ausschließen. Dies hat uns deshalb veranlaßt, die holographische Fingerabdruckklassifizierung in Betracht zu ziehen (vgl. 6.1.2.3), die Voraussetzungen zur indirekten Identifizierung mit rationellen Mitteln (EDV-Anlagen) liefert.

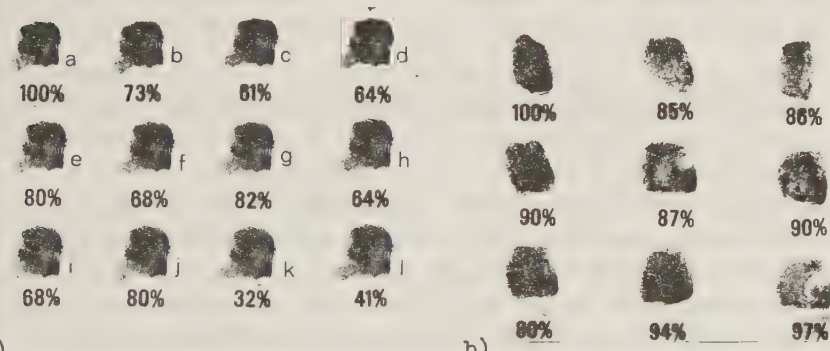
Die wichtigsten Probleme, die im folgenden ausführlicher erläutert werden und nach unserer Meinung zum Scheitern der holographischen Fingerabdruckidentifizierung geführt haben, sind in erster Linie die unkontrollierbaren Verzerrungen der Pappilarlinien, die verschieden große Fläche der Vergleichsabdrücke und die Rotationsabhängigkeit des holographischen Identifizierungsverfahrens. Nicht ohne weiteres vernachlässigbar sind außerdem auch Einflüsse des Trägermaterials (z.B. Filme) auf das Erkennungssignal. Zur Versuchsdurchführung diente die gleiche Anordnung, die auch zur Erkennung alphanumerischer Zeichen verwendet wurde (Bild 4).

6.1.2.2.1. Einfluß von Verzerrungen und verschieden großen Fingerabdruckflächen

Der Einfluß von Verzerrungen, deren Auftreten in der Praxis durchaus sicher ist, auf das Erkennungssignal wurde an einer kleinen Anzahl von 1) künstlich und 2) natürlich verzerrten Abdrücken untersucht. Im Gegensatz zum zweiten Fall wurde durch die mit künstlichen Mitteln erzeugten Verzerrungen erreicht, daß bei verschieden großen Verzerrungsgraden immer die gleiche

Fläche des Fingerabdruckes bei unveränderter Druckqualität verglichen werden konnte.

- 1) Zur künstlichen Erzeugung von Verzerrungen wurde eine Spannvorrichtung verwendet, mit deren Hilfe die Maßstäbe eines auf einer Gummifolie befindlichen Fingerabdruckes in willkürlicher Weise verändert werden konnten. Bei bestimmten Spannlagen wurden die deformierten Abdrücke auf photographisches Filmmaterial übertragen und in dieser Form zur Filterherstellung bzw. zum Korrelationsprozeß in der Objektebene des Korrelators angebracht. In Bild 29a sind die durch derartige Papillarlinienverzerrungen entstandenen Fingerabdruckformen und darunter jeweils der prozentuelle Anteil des Meßsignals zum Autokorrelations-signal wiedergegeben.



a)

b)

Bild 29. Abhängigkeit des Erkennungssignals
a) von simulierten Fingerabdruckverzerrungen und
b) von natürlichen Fingerabdruckabweichungen von der Sollform

Die Reihenfolge der Vergleichsabdrücke (a,b,....) entspricht dem steigenden Verzerrungsgrad. Der Autokorrelationswert (d.h. der Intensitätswert der bei Ansteuerung des Filters mit dem RFS des gleichen Abdruckes gemessen wurde, der zur Filterherstellung diente) ist für diesen (relativen) Vergleich auf den Wert 100 % normiert. Die

Maßstabsänderungen betrugen bezüglich der Gesamtbreite des Abdruckes bis ca. 2 mm und bezüglich Gesamthöhe bis ca. 3 mm.

Der Vergleich der Meßsignale zeigt, daß die Intensität der Erkennungssignale im Extremfall bis auf ein Drittel des Sollwertes abnehmen kann. Solche extrem niedrigen Werte können aber außer Acht gelassen werden, weil sie zu so großen Verzerrungen gehören, die in der Praxis unwahrscheinlich sind. Als realistische Werte sind dagegen Signalabweichungen bis ca. 35 % vom Autokorrelationswert zu erwarten. Die unregelmäßige Ab- und Zunahme der Signalintensitäten könnte darauf zurückgeführt werden, daß bei bestimmten Verzerrungsgraden gerade solche Abstände zwischen den Papillarlinien vorhanden sind, die den Abständen des für die Filterherstellung verwendeten Abdruckes gleich sind.

- 2) In Anlehnung an die praktischen Verhältnisse wurden mehrere Abdrücke des gleichen Fingers einer Person gewonnen und verglichen. Diese Abdrücke besaßen deshalb sowohl eine unterschiedlich große Fläche als auch verschieden starke Verzerrungen. Eine geringe, jedoch durchaus repräsentative Anzahl aus diesen Abdrücken ist mit den dazugehörigen prozentualen Signalanteilen in ähnlicher Weise wie in 1) im Bild 29b wiedergegeben. Im Vergleich zum ersten Fall sind hier, trotz der unterschiedlichen Flächengrößen, relativ geringere Signalabweichungen festzustellen. Dieses Verhalten ist teils auf die spezielle Struktur des betrachteten Fingerabdruckes, teils auf die relativ kleinen Abstandsabweichungen der Papillarlinien zurückzuführen.

Eine weitere Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz des holographischen Identifizierungsverfahrens ist auch die Kenntnis des Signalbeitrages, den die einzelnen Fingerabdrucksegmente zum gesamten Erkennungssignal liefern, weil am Tatort oft nur Ausschnitte von den z.B. in den Karteien registrierten Abdrücken sichergestellt werden können.

Zur Ermittlung des Beitrages derartiger Fingerabdrucksegmente zum Erkennungssignal wurde im Strahlengang vor der Objektebene (Bild 4) mit einer Lochblende (Durchmesser ca. 10 mm) schrittweise jeweils nur ein Teil aus der gesamten Fingerabdruckfläche (ca. $25 \times 20 \text{ mm}^2$) beleuchtet. Verzerrungen spielten also hier keine Rolle. Die auf diese Weise gemessenen Signalintensitäten sind für zwei daktyloskopisch unterschiedliche Fingerabdrücke im Bild 30 graphisch dargestellt.

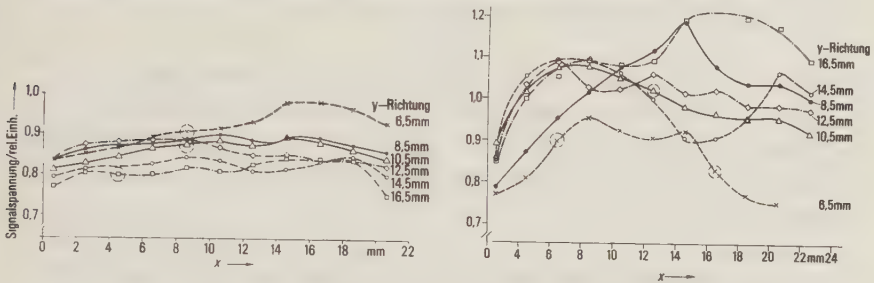


Bild 30. Signalbeiträge einzelner Fingerabdrucksegmente von zwei daktyloskopisch verschiedenen Fingerabdrücken

Als Abszisse wurde jeweils der Abstand des äußeren Punktes der betrachteten Fingerabdrucksegmente von der optischen Achse - sie fiel mit dem Zentrum der Lochblende zusammen - als Ordinate die oszillographisch gemessene Signalspannung (vgl. 5.1.2) und als Parameter die Lage der Fingerabdrücke in der y-Richtung der Objektebene gewählt. Die Signale wurden sowohl in der x- als auch in der y-Richtung jeweils alle 2 mm gemessen. Daktyloskopisch betrachtet besaßen beide Versuchsabdrücke nicht nur unterschiedliche Merkmale, sondern auch verschieden stark gekrümmte Papillarlinien. Die Meßwerte aus dem Fingerabdruck mit den stark gekrümmten Papillarlinien sind im Bild 30b wiedergegeben.

Der Vergleich der Kurven zeigt eine relativ starke Abhängigkeit des Meßsignals von der Struktur der für die Ansteuerung

der Filterhologramme verwendeten Abdrucksegmente. Charakteristische Stellen (d.h. Stellen mit hohem Informationsgehalt (Schleifen, starke Krümmungen usw.)), die in beiden Kurvendigrammen durch Kreise gekennzeichnet sind, lieferten nicht höhere, sondern mittlere Signalbeiträge. Sehr auffallend sind weiterhin die Unterschiede zwischen den Meßkurven beider Abdrücke. So treten z.B. bei dem im Bild 30b verwendeten Abdruck in beiden Richtungen größere Signalabweichungen auf als im anderen Fall.

Maßgebend für alle hier auftretenden Signalschwankungen dürfte in erster Linie der Unterschied zwischen den Intensitätsverteilungen der RFS.n des gesamten zur Filterherstellung verwendeten Fingerabdruckes und der einzelnen Fingerabdrucksegmente sein.

6.1.2.2.2. Winkelabhängigkeit des Korrelationsprozesses

Ein wichtiges Problem, das auch bei der holographischen Fingerabdruckidentifizierung eine gravierende Rolle spielt, liegt darin, daß das holographische Zeichenerkennungsverfahren innerhalb gewisser Grenzen (vgl. 6.2.2) zwar translations-, aber nicht rotationsinvariant ist. Eine Abweichung der Lage der Fingerabdrücke von der Sollage kann aber vor allem dann auftreten, wenn der Film oder die Glasplatten, die als Träger der Fingerabdruckinformation in Frage kommen, nach dem vorgesehenen Verfahren mit relativ großer Geschwindigkeit durch die Objektebene geführt werden sollen. Weitere Abweichungen von der Sollage können außerdem bei der Übertragung der Fingerabdruckinformation von den bisherigen Papierunterlagen auf transparente Trägermaterialien auftreten. Die Rotationsabhängigkeit könnte nur mit einem Vielkanalkorrelator kompensiert werden (vgl. auch 4.2 und 4.3), dessen Filter die Abweichungen der Rotationslagen berücksichtigen. Zur Dimensionierung eines derartigen Systems ist aber die genaue Kenntnis der Rotationsab-

hängigkeit des Korrelationsprozesses erforderlich. Diese Rotationsabhängigkeit wird im folgenden anhand experimenteller Ergebnisse beschrieben, die am Beispiel eines Fingerabdruckes erhalten wurden (Bild 31).

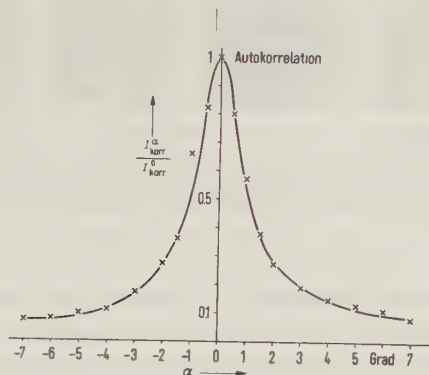


Bild 31. Winkelabhängigkeit des Korrelationssignals, wie es am Beispiel eines Fingerabdruckes gemessen wurde

Als Meßmethode diente das in 5.1.2 beschriebene Verfahren. Eingetragen sind als Abszisse die Winkeländerung von der Sollage (0°) in beiden Richtungen (durch - bzw. + gekennzeichnet) und als Ordinate das Verhältnis zwischen den Signalintensitäten bei den Winkeln $|\alpha| > 0^\circ$ zur Signalintensität bei 0° (vgl. auch /81/). Die 0° -Lage entspricht also der Lage, die der Fingerabdruck bei der Filterherstellung besaß, und hat die Rekonstruktion der höchsten Signalintensität zur Folge. Der Kurvenverlauf zeigt eine symmetrische und relativ starke Signalabnahme in beiden Winkelrichtungen. Winkelabweichungen von nur 1° bewirken demnach bereits eine Signalabnahme von ca. 50 %; bei 4° sinkt die Signalintensität sogar bis auf ca. 10 % des Ausgangswertes.

Im Gegensatz zu dieser quantitativen Darstellung der Signalabhängigkeit haben die fünf in Bild 32 wiedergegebenen Auf-

nahmen qualitative Aussagen über die zweidimensionalen Intensitätsverteilungen der Korrelationssignale für fünf Winkellagen ermöglicht.¹⁾

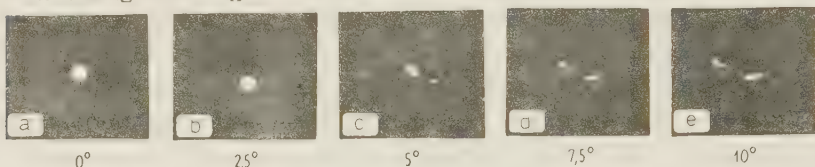


Bild 32. Qualitativer Verlauf der zweidimensionalen Intensitätsverteilung des Korrelationssignals für fünf Winkellagen eines Fingerabdruckes

Aus dem Vergleich der Aufnahmen, die unter gleichen Bedingungen aufgenommen wurden, geht hervor, daß nicht nur die oben erwähnte Abnahme der Signalintensitäten eintritt, sondern auch eine ständig wachsende Verformung und eine Vergrößerung der Signalfläche. Beim Drehwinkel von $7,5^\circ$ tritt beispielsweise neben dem in seiner Intensität stark reduzierten Maximum der Lage 0° ein weiteres Maximum auf, das fast ebenso intensiv wie das erste zu sein scheint. Die von der Winkellage abhängige Vergrößerung der Signalflächen kann besonders bei Registrierung der Signalintensität mit festen Photodetektoren zu großen Problemen führen, weil der Signalabstand zwischen Auto- und Kreuzkorrelationssignalen sehr stark von der effektiven Detektorfläche abhängig ist. Ähnliche Ergebnisse bezüglich der Winkelabhängigkeit des Korrelationsprozesses erhielt an dem einfachen Beispiel eines Spaltes auch G. Winzer /92/.

6.1.2.2.3. Einfluß der Trägermaterialien

Eine weitere Forderung, die für den praktischen Einsatz des holographischen Zeichenerkennungsverfahrens (allgemein) erfüllt werden muß, ist, daß die Zeicheninformation in Form einer ört-

¹⁾ Diese Lichtverteilungen wurden bei konstanter Beleuchtungsintensität und bei unveränderter Schwelleneinstellung direkt vom Fernsehschirm photographiert.

lichen Lichttransmissionsverteilung, d.h. in transparenter Form vorliegen soll. Diese Forderung könnte jedoch bei der holographischen Fingerabdruckidentifizierung beispielsweise durch die bereits aus anderen Gründen (z.B. Platzersparnis) angestrebte Übertragung der Fingerabdruckinformation auf Mikrofilm erfüllt werden. Andere Träger, die für den gleichen Zweck ebenfalls in Frage kommen, sind die photographischen Glasplatten. Die beste für sämtliche holographische Zeichen-erkenntnisprozesse geeignete Methode ist zweifelsohne die Direktzeitwandlung der Zeicheninformation beispielsweise mit der sog. „TITUS“-Röhre /99/; vgl. auch 6.2.3. Da aber derartige Wandlerverfahren sich noch im Experimentierstadium befinden, haben wir speziell für den Fall der Fingerabdruckidentifizierung die Einflüsse der Qualität der Filmmaterialien auf das Erkennungssignal untersucht. An derartige Materialien werden vor allem wegen der Phasenempfindlichkeit des holographischen Verfahrens (vgl. auch 6.2.3) hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen möglichst eben, völlig transparent, verzugs- und schlierenfrei und nicht zuletzt billig sein.

Versuche mit handelsüblichen Materialien führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen, weil die Materialien einerseits nicht genügend transparent waren und andererseits sehr stark streuten. Beide Ursachen hatten starke Signalabnahmen zur Folge. Wesentlich bessere Ergebnisse erzielten wir dagegen mit dem Du Pont 007 Cronar Filmmaterial, das sich durch Verzugsfreiheit und einwandfreie Transparenz auszeichnet. Die Photoschicht selbst besitzt ein hohes Auflösungsvermögen und eine steile Kennlinie. Auf diesem Filmmaterial wurden von einem einzigen photographischen Negativ eines Fingerabdruckes (unter sonst konstanten Bedingungen) zehn Kopien hergestellt und anschließend bei Ansteuerung eines Filters einer Kopie sämtliche Korrelationssignale gemessen. Die Ergebnisse haben gezeigt, daß der Einfluß des gewählten Trägermaterials auf das Erkennungssignal relativ gering ist. Die Signalabweichungen betrugen maximal 3 %.

6.1.2.2.4. Schlußbemerkungen

Am Beispiel einer kleinen, jedoch durchaus ausreichenden Anzahl von Fingerabdrücken wurde gezeigt, daß das an sich interessante holographische Verfahren zumindestens für die Fingerabdruckidentifizierung nicht geeignet ist. Diese Feststellung veranlaßte uns, derartige Versuche einzustellen. Nachdem dieser Vorschlag zur Fingerabdruckidentifizierung seit mehr als 6 Jahren bekannt ist /20/, und aus der Tatsache, daß bisher kein derartiges System im Einsatz ist, kann (trotz des Optimismus von Watrasilenitz /107/) angenommen werden, daß in der Zwischenzeit auch andere Gruppen, die sich damit befaßt haben, zur gleichen Schlußfolgerung gelangt sind.

Im Gegensatz zur Identifizierung kann jedoch die holographische Fingerabdruckklassifizierung aussichtsreicher sein, weil dazu nicht mehr die ganze Fingerabdruckinformation integral verglichen werden muß, sondern nur die Merkmale, die einen relativ sehr geringen Teil der gesamten Fingerabdruckfläche belegen. Mit der Reduzierung der für den Klassifizierungsvorgang benötigten Fingerabdruckfläche ist deshalb auch eine entsprechende Reduzierung der oben diskutierten Einflüsse zu erwarten. Dieses Klassifizierungsverfahren, das speziell dafür entwickelt wurde, wird ausführlicher im nächsten Abschnitt beschrieben.

6.1.2.3. Klassifizierung von Fingerabdrücken

Zur Klassifizierung der bisher in den Fingerabdrucksammlungen vorhandenen Abdrücke sind zur Zeit erfahrene Daktyloskopen eingesetzt, die jeden einzelnen Fingerabdruck vergrößert auf einem Bildschirm betrachten und aufgrund der Lage, der Art und der Häufigkeit von Grundmustern und anatomischen Merkmalen (Bild 33) die Fingerabdrücke bestimmten Gruppen zuordnen, die durch mathematische Formeln gekennzeichnet sind.

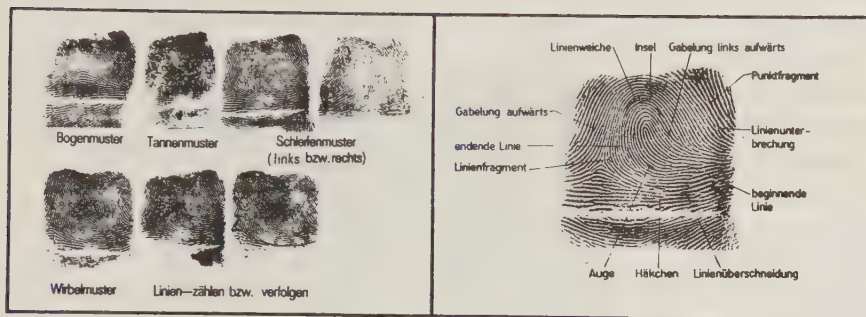


Bild 33. Fingerabdruck-Klassifizierungsverfahren nach Galton und Henry /103/

Die Erstellung dieser Formeln basiert auf dem von Galton und Henry /101/ vorgeschlagenen Klassifizierungsverfahren. Sämtliche Daten werden anschließend auf solche Träger übertragen, die für die elektronische Datenverarbeitung geeignet sind (Lochkarten, Magnetbänder) und den Identifizierungsvorgang schnell und rationell ermöglichen. Die Grundmuster, die lediglich zur Bestimmung der Fingerabdruckhauptklassen dienen, sind in der linken Aufnahme des Bildes 33 zusammengestellt. Nach /102/ handelt es sich um folgende Grundmuster: Bogenmuster, Tannenmuster, nach links auslaufende Schleifenmuster, nach rechts auslaufende Schleifenmuster und Wirbelmuster. Die Hauptklassen bestehen aus Unterklassen, die eine zusätzliche Verringerung der Anzahl der Fingerabdrücke jeder Kategorie ermöglichen. Die Unterklassen werden in der Zehnfingerklassifikation (vgl. zwei letzte Abdrücke) bei Schleifen durch das Linienzählen und bei Wirbeln durch das Linienverfolgen gebildet. Um die ständig wachsende Anzahl der Fingerabdrücke, die der gleichen Kategorie angehören, weiter zu reduzieren, wird zur Zeit durch Aufnahme zusätzlicher Unterscheidungskriterien ver-

sucht, die Formel zu erweitern. Eine Erweiterung ist z.B. möglich, wenn in die Formel auch anatomische Merkmale¹⁾, wie Gabelungen, Augen, Inseln, Linienweichen usw. aufgenommen werden. Die Erhöhung der Anzahl der zu berücksichtigenden Merkmale ermöglicht zwar erwartungsgemäß eine Vergrößerung der Fingerabdrücke jeder Kategorie, der Klassifizierungsvorgang erfordert aber wegen der nichtautomatischen Aufstellung der Formel und wegen der großen Anzahl der vorhandenen Abdrücke einen sehr hohen Aufwand. Man rechnet beispielsweise, daß für die Erstellung der Formeln sämtlicher in der Bundesrepublik vorhandenen Fingerabdrücke mit dem heute zur Verfügung stehenden personellen und maschinellen Aufwand eine Zeit von mehreren Jahrzehnten nötig wäre.

6.1.2.3.1. Verfahren

Zur schnelleren und rationellen Durchführung des Klassifizierungsprozesses wurde deshalb die Verwendung eines holographischen Vielkanalkorrektors vorgeschlagen, dessen Filter die Information sämtlicher Grundmuster und anatomischer Merkmale erhalten sollen. Da innerhalb von bestimmten Grenzen sowohl die Form und Größe als auch die Winkellage jedes Musters und jedes Merkmals sich ändern können, wäre zur Kompensation dieser Toleranzbereiche sogar eine größere Filterzahl erforderlich als die Summe der Muster und Merkmale. Die Anordnung der Filterhologramme könnte dann beispielsweise nach dem im Bild 34 gezeigten Muster erfolgen. Bei sequentieller Ansteuerung der Filter (vgl. 4.3.6) mit dem RFS des ganzen Fingerabdruckes entstehen in der Detektorebene nur dann intensive Lichtsignale, wenn an den korrespondierenden Stellen des betrachteten Fingerabdruckes die Merkmale

1) Als Merkmal kann man im allgemeinen verschiedene Eigenarten der Figuren auswählen, wie beispielsweise ihre geometrischen Eigenschaften (charakteristische Kurven, aus denen die Zeichen bestehen), topographische Eigenschaften (die gegenseitige Anordnung der Elemente der Figuren) und dergleichen mehr; vgl. auch /81/.

vorhanden sind deren Filter gerade angesteuert werden.

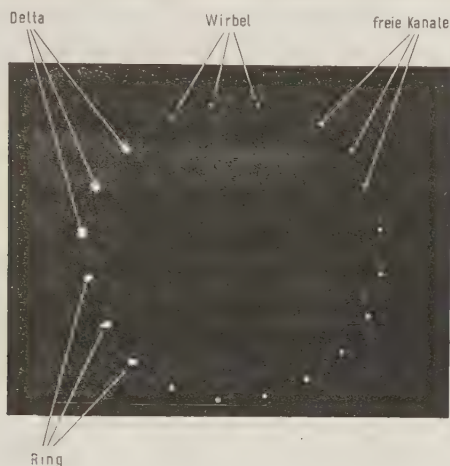


Bild 34. Demonstrationsbeispiel zur Filteranordnung bei der holographischen Fingerabdruckklassifizierung

(Beim einmaligen Vorhandensein eines Merkmals entsteht prinzipiell auch nur ein intensives Signal). Durch Auswertung der Signalintensitäten kann also ein wesentlicher Teil der für die Zuordnung der Fingerabdrücke zu den mathematischen Formeln erforderlichen Daten gewonnen werden. Die zusätzlich dazu erforderliche Zählung der Papillarlinien zwischen den vorgegebenen Merkmalen kann nach Kiemle /22/ mit Hilfe eines steuerbaren Lichtpunktabtasters geschehen. Die elektronische Steuerung des Lichtablenkers ist so zu dimensionieren, daß ein gebündelter Lichtstrahl, der mit Hilfe eines Strahlteilers auch von der gleichen Lichtquelle des Korrelators abgezweigt werden kann, zwischen den bereits erkannten Orten der dafür bestimmten Merkmale geführt wird. Ist nun der Lichtpunktdurchmesser kleiner als die Dicke der Papillarlinien, so kann man mit geeigneten Photodetektoren die Anzahl der Intensitäts-Maxima oder -Minima und damit auch die Anzahl der Papillarlinien ermitteln.

6.1.2.3.2. Experimentelle Ergebnisse

In einem Korrelator, der dem im Bild 4 schematisch dargestellten entsprach, führten wir erste Prinzipversuche zur holographischen Fingerabdruckklassifizierung durch. Als Versuchsobjekt wurde der Einfachheit halber vorerst der aus /102/ stammende und in Bild 35a wiedergegebene simulierte Abdruck verwendet.

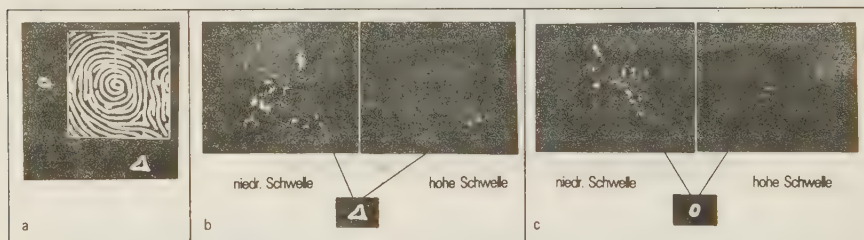


Bild 35. Holographische Merkmalfilterung zur Klassifizierung von Fingerabdrücken

- a) Simulierter Abdruck aus /102/ mit den zwei für die Versuchsdurchführung verwendeten Merkmalen Delta und Ring,
- b) und c) Erkennung der Merkmale Delta bzw. Rings

Zur Filterherstellung dienten die beiden Merkmale Ring (innerer Terminus) und Delta (äußerer Terminus). Sie sind im gleichen Maßstab und in der gleichen Winkellage gesondert auch neben dem Abdruck abgebildet. Bei Ansteuerung des Delta-Filters mit dem RFS des ganzen Abdruckes erscheint am Fernsehschirm (bei niedriger Schwelle) die links im Bild 35b wiedergegebene Lichtverteilung. Erhöht man dagegen die Helligkeitsschwelle bis zu einem bestimmten Wert, dann erscheint als Erkennungsmerkmal nur ein intensiver Lichtpunkt, das Autokorrelationssignal; sein Entstehungsort in der Detektorebene entspricht der Stelle des Merkmals im Abdruck (vgl. Pfeil in Bild 35b).

In Analogie dazu zeigen schließlich die beiden letzten Aufnahmen vom Bild 35c die Lichtverteilung, die bei Ansteuerung des Ringfilters mit dem RFS desselben Abdruckes entsteht. Das Autokorrelationssignal erscheint erwartungsgemäß auch hier an der korrespondierenden Stelle des Ringes im Fingerabdruck.

6.1.2.3.3. Schlußbemerkung

Am Beispiel von zwei Merkmalen eines simulierten Abdruckes wurde mit relativ geringem Aufwand gezeigt, daß, im Gegensatz zur Fingerabdruckidentifizierung das Verfahren der holographischen Fingerabdruckklassifizierung aussichtsreicher ist. Die praktische Eignung des Verfahrens hängt jedoch vom Ausgang weiterer Untersuchungen mit reellen Fingerabdrücken ab. Derartige zunächst vorgesehene Versuche konnten wegen der Wichtigkeit der in den nächsten Abschnitten beschriebenen Untersuchungen nicht durchgeführt werden.

6.1.3. Zeichenerkennung durch raummultiplexe Vielkanalkorrelation

6.1.3.1. Parallele Vielkanalkorrelation mit geringer Kanalzahl

Zur Durchführung von ersten prinzipiellen Untersuchungen mit Vielkanalkorrelationssystemen verwendeten wir als Beleuchtungswellengeneratoren anfangs Hologramme und Amplituden-Kreuzgitter; vgl. 4.3.1 und 4.3.2. Die experimentellen Ergebnisse, die mit fünf holographisch erzeugten Beleuchtungswellen unterschiedlicher Richtung erzielt wurden, werden hier nicht ausführlich behandelt, weil die bei diesem ersten Experiment gemessenen Autokorrelationsintensitäten relativ niedrig waren. Eine Erhöhung der Signalintensitäten könnte allerdings dabei beispielsweise durch Optimierung der Aufnahmebedingungen bei mehrfacher Belichtung der Photoplatte erzielt werden. Derartige Versuche, die relativ aufwendig sind, wurden jedoch nicht durchgeführt, weil mit vorhandenen Amplituden-Kreuzgittern wesentlich bessere Ergebnisse erhalten werden konnten. Das RFS eines Amplituden-Kreuzgitters (d.h. definitionsgemäß die Gitterinformation in der Brennebene der Transformationslinse), dessen intensivste Beugungsordnungen als Kanäle verwendet wurden, ist im Bild 36a wiedergegeben.

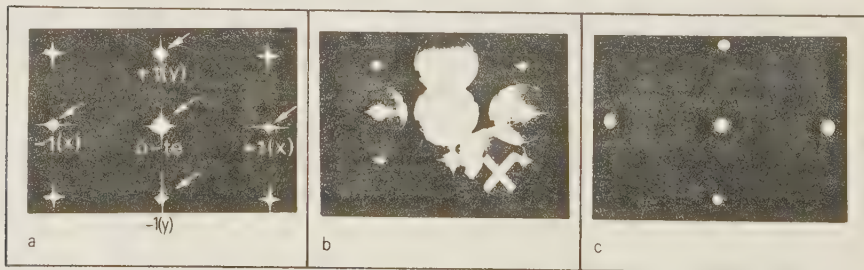


Bild 36. Vielkanalkorrelation bei Besetzung sämtlicher Filterplätze mit Filtern für die Ziffer 0:
a) RFS des zur Erzeugung der Objektwellenrichtungen verwendeten (kodierten) Kreuzgitters,
b) RFS wie a), jedoch mit zusätzlicher Modulation der Ziffer 0 auf die fünf intensivsten Beugungsordnungen und bei Überlagerung der Referenzwelle und
c) fünf Autokorrelationssignale der Ziffer 0

Die Beugungsordnungen erscheinen nicht als scharfe Punkte, weil die Gitter, die uns zur Zeit der Versuchsdurchführung zur Verfügung standen, einen Signalcode enthielten, der für andere Versuchsreihen bestimmt war. Verwendet wurden die fünf intensivsten Beugungsordnungen ($0., +1.(x), +1.(y), -1.(x)$ und $-1.(y)$ ¹⁾). Bild 36b enthält als Demonstrationsbeispiel die Lichtverteilungen, die in der Filterebene bei Beleuchtung der Ziffer 0 mit den fünf Beugungsordnungen eines Amplitudenkreuzgitters und bei Überlagerung der Referenzwelle entstehen. (Die mit x gekennzeichnete Beugungsordnung wurde versehentlich aufgenommen). Diese Lichtverteilungen dienten anschließend auch zur Filterherstellung. Da es sich hier um Filter handelt, die mit der gleichen Referenzwellenrichtung hergestellt wurden, überlagern sich bei paralleler Ansteuerung aller Filter sämtliche Autokorrelationssignale an der gleichen Stelle der Brennebene der Abbildungslinse (Bild 14c). Zur Trennung der Autokorrelationssignale wurde deshalb die Detektorebene der verwendeten Fernsehkamera kurz vor die Brennebene der Linse gestellt. Die fünf dadurch getrennten Autokorrelationssignale der Ziffer 0 sind so, wie sie vom Fernsehschirm photographiert wurden, im Bild 36c wiedergegeben.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die fünf verfügbaren Kanäle zur Herstellung von Filtern für die fehlerfreien (vgl. 6.2.1) Ziffern 0,3,5,7 und 9 verwendet. Die Reihenfolge der Filter entspricht der im Bild 37 wiedergegebenen Kanaluordnung. Bei gleichzeitiger Ansteuerung sämtlicher Filter mit dem RFS jeder Ziffer, z.B. durch Abdeckung der übrigen Ziffern, entsteht in der Detektorebene - sie lag auch in diesem Fall außerhalb der Brennebene - jeweils nur an denjenigen Stellen ein intensives Autokorrelationssignal, die prinzipiell der Lage der Ziffern in der Objektebene entsprechen. Die so

¹⁾ Eine wesentliche Erhöhung der Intensität dieser Beugungsordnungen kann wegen des besseren Beugungswirkungsgrades (vgl. 6.2.3) mit Phasengittern erreicht werden.

rekonstruierten Korrelationssignale sind für die fünf Ziffern 0,3,5,7 und 9 im Bild 37 wiedergegeben.



Bild 37. Vielkanalkorrelation bei Besetzung der fünf Filterplätze mit Filtern für die Ziffern 0,3,5,7 und 9

Neben den Autokorrelationssignalen der Ziffern 0 und 9 erscheinen schwach jeweils auch die Kreuzkorrelationssignale der Ziffern 9 bzw. 0, weil sie ein sehr ähnliches RFS besitzen. Die übrigen Kreuzkorrelationssignale wurden durch die Helligkeitsregelung des Fernsehschirmes vollständig unterdrückt.

Trotz der relativ guten Signalverhältnisse (z.B. im Vergleich zudem oben erwähnten Fall der mehrfach belichteten Hologrammplatte) wurden auch hier keine quantitativen Messungen durchgeführt, weil die dadurch mit tragbarem Aufwand überhaupt realisierbare Kanalzahl nicht den praktischen Forderungen genügen kann. Abgesehen von Lichtverlusten (z.B. durch Absorption) hätte eine derartige Erhöhung der Kanalzahl auch eine zusätzliche Reduzierung der Nutzintensität der Korrelationssignale zur Folge (vgl. auch 4.3.3), weil die Intensität der Beugungsordnungen mit wachsender Ordnungszahl sehr stark abnimmt. In der Zwischen-

zeit ist bekannt geworden /85/, daß mit Computerprogrammen Gitter hergestellt werden können, die die Beleuchtungsintensität in mehrere Kanäle (Beugungsordnungen) mit gleicher Intensität und geringen Verlusten aufteilen.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Filterzahl mit Gittern ist gegeben, wenn man die Filterhologramme nicht parallel, sondern z.B. durch Rotation eines verlustarmen Gitters sequentiell ansteuert. Bei Systemen mit sequentieller Filteransteuerung ist jedoch, wie wir in 4.3.6 gesehen haben, die Verwendung einer Keilplatte vorzuziehen. In den beiden folgenden Abschnitten 6.1.3.2 und 6.1.3.3 werden deshalb experimentelle Ergebnisse behandelt, die mit Hilfe einer derartigen Keilplatte erzielt wurden.

6.1.3.2. Sequentieller Vielkanalkorrelator mit niedrigen Ansteuergeschwindigkeiten

Sequentiell ansteuerbare Vielkanalkorrelatoren sind den parallelen Systemen sowohl im Hinblick auf höhere Nutzsignalintensitäten (vgl. 4.3.3) als auch auf günstigere Signal-Störlicht-Verhältnisse (vgl. 4.3.4) weit überlegen. Zur Ermittlung der absoluten Nutzsignalintensitäten und Signal-Störlicht-Verhältnisse, die in der Praxis zu erwarten sind, verwendeten wir deshalb ein sequentielles System (Bild 16) mit einer Keilplatte als Beleuchtungswellenerzeuger. Um eine direkte photometrische Registrierung des Intensitätsprofils zu ermöglichen (vgl. 5.1.2), wurde die in 4.3.6.1 beschriebene Anordnung mit einer relativ niedrigen Ansteuerungsgeschwindigkeit eingesetzt. Weiterhin wurden die bisher verwendeten und zeichnerisch hergestellten Ziffern (Bild 38) durch solche ersetzt, die mit einer gewöhnlichen Schreibmaschine (Adler electric 151 f) getippt wurden. Sie entsprechen deshalb mehr den realen Druckqualitätsverhältnissen. Mikroskopisch betrachtet ist die



Bild 38. Zeichnerisch hergestellte und maschinengeschriebene Zeichen für die Durchführung der Versuche

Randstruktur derartiger Ziffern im Vergleich zu den zeichnerisch hergestellten Zeichen stark unregelmäßig und hängt hauptsächlich von der Qualität des Farbbandes der Schreibmaschine ab; vgl. auch 6.2.1.

Mit solchen Ziffern wurden zwei Versuchsreihen bei jeweils verschiedenen Filterpackungsdichten durchgeführt. Für die erste Versuchsreihe wurden 40 und für die zweite 20 Filterhologramme (jeweils vier bzw. zwei für die Ziffern 0 bis 9) hergestellt und angesteuert (Bild 39).

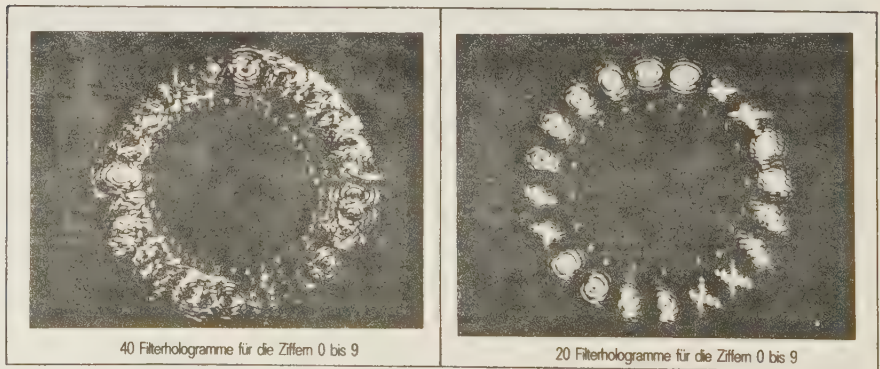


Bild 39. Aufnahmen der 40 bzw. 20 Filterhologramme aus den zwei Versuchsreihen nach der optischen Anordnung von Bild 23

Die Breite der Kreiszone, auf der die Filter untergebracht waren, betrug in beiden Fällen 4 mm und der Kreisdurchmesser ca. 20 mm. Bild 40 gibt die photometrisch registrierten Signalintensitäten wieder, die bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit den RFS.n der Ziffern 1,3 und 6 gemessen wurden. Es wurden nur die Kurvenreihen dieser drei Ziffern ausgewählt, weil sie aufgrund ihrer Zusammensetzung (entweder gerade oder runde oder gemischte Linienanteile) als weitgehend repräsentativ für sämtliche Ziffern dieses Typs betrachtet werden können. Die restlichen sieben Kurvenreihen sind im Anhang A enthalten. Unterhalb jeder Schreiberkurve ist jeweils die dazugehörige Ziffer bei Auto- bzw. Kreuzkorrelation eingetragen. Die Registrierung der Signalintensitäten geschah unter sonst konstanten Bedingungen.

Aus dem Vergleich der Signalintensitäten der drei ausgewählten Kurvenreihen geht hervor, daß die besten Signalverhältnisse (d.h. relativ große Abstände zwischen Auto- und Kreuzkorrelationssignalen) bei Ansteuerung der Filter mit dem RFS der Ziffer 1 auftreten (Bild 40a). Berücksichtigt man zusätzlich auch die Kurvenreihen der übrigen Ziffern aus dem Anhang A, so treten die günstigsten Signalverhältnisse bei Ansteuerung der Filter mit den Ziffern 4 und 7 auf, die, wie die 1, nur aus geraden Anteilen zusammengesetzt sind. Die ungünstigsten Signalverhältnisse liefert dagegen die Ziffer 6 (Bild 40c). Weiterhin ist auch eine relativ starke Abweichung zwischen den Autokorrelationssignalintensitäten erkennbar. Diese starken Abweichungen sowohl zwischen den Autokorrelationssignalen als auch zwischen den Verhältnissen von Auto- zu Kreuzkorrelationssignalen, sind in erster Linie auf die unterschiedlichen Filterqualitäten (vgl. 5.2) und auf die teilweise Überlagerung der Filter (Bild 39 links) zurückzuführen.

Der zweite Grund veranlaßte uns, die Filterzahl für die nächste Versuchsreihe auf die Hälfte zu reduzieren. Die damit registrierten Signalintensitäten sind in gleicher Weise wie bei der ersten Versuchsreihe in den drei folgenden Bildern 41a, b, c bzw. im Anhang B wiedergegeben.

Der Vergleich der Signalintensitäten beider Versuchsreihen zeigt, daß durch Verhindern der Bilderüberlagerung bessere Signalverhältnisse erzielt werden können. Sonst herrschen weitgehend die gleichen Verhältnisse wie bei der ersten Versuchsreihe.

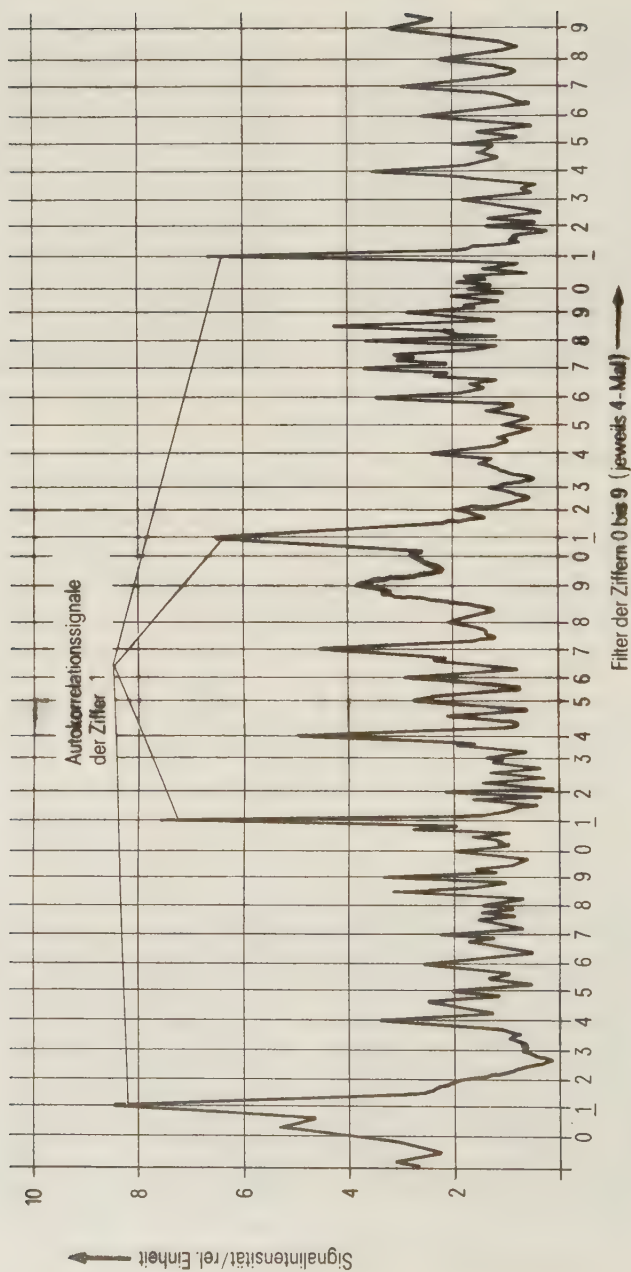


Bild 40a. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 1

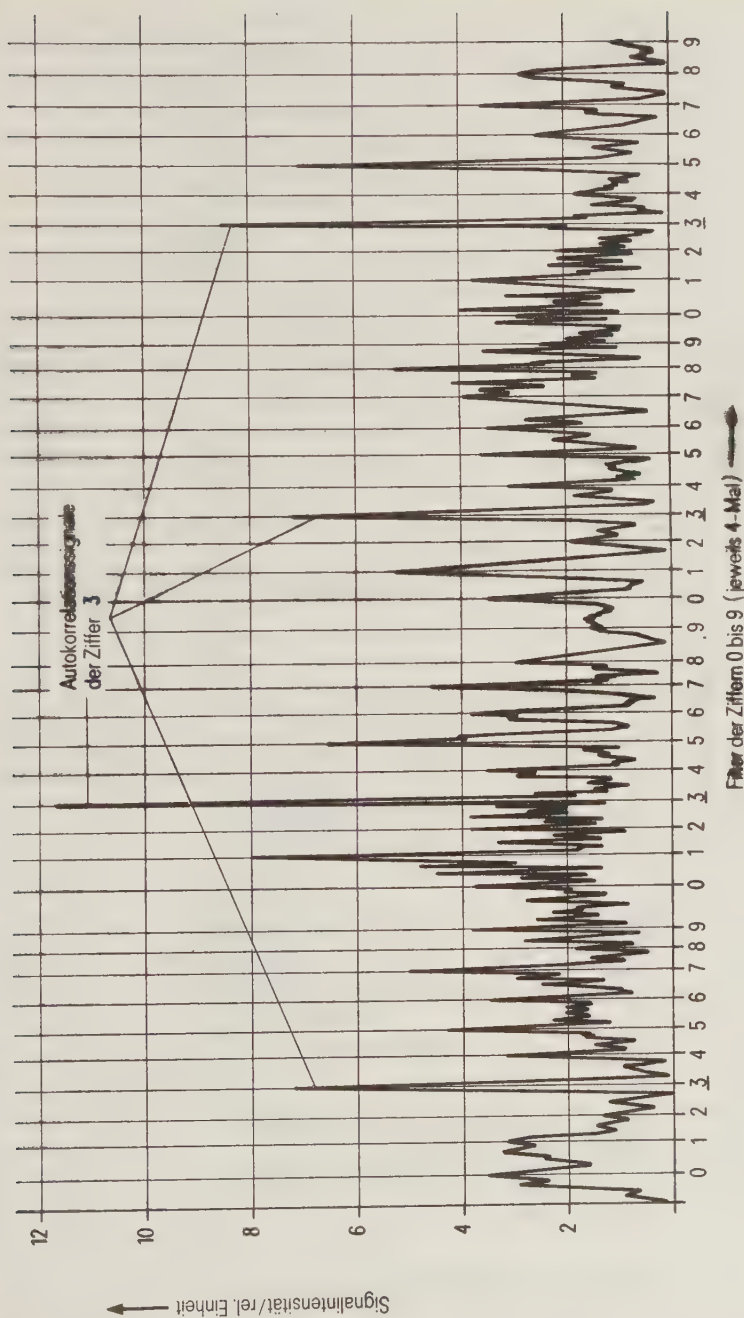


Bild 40b. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 3

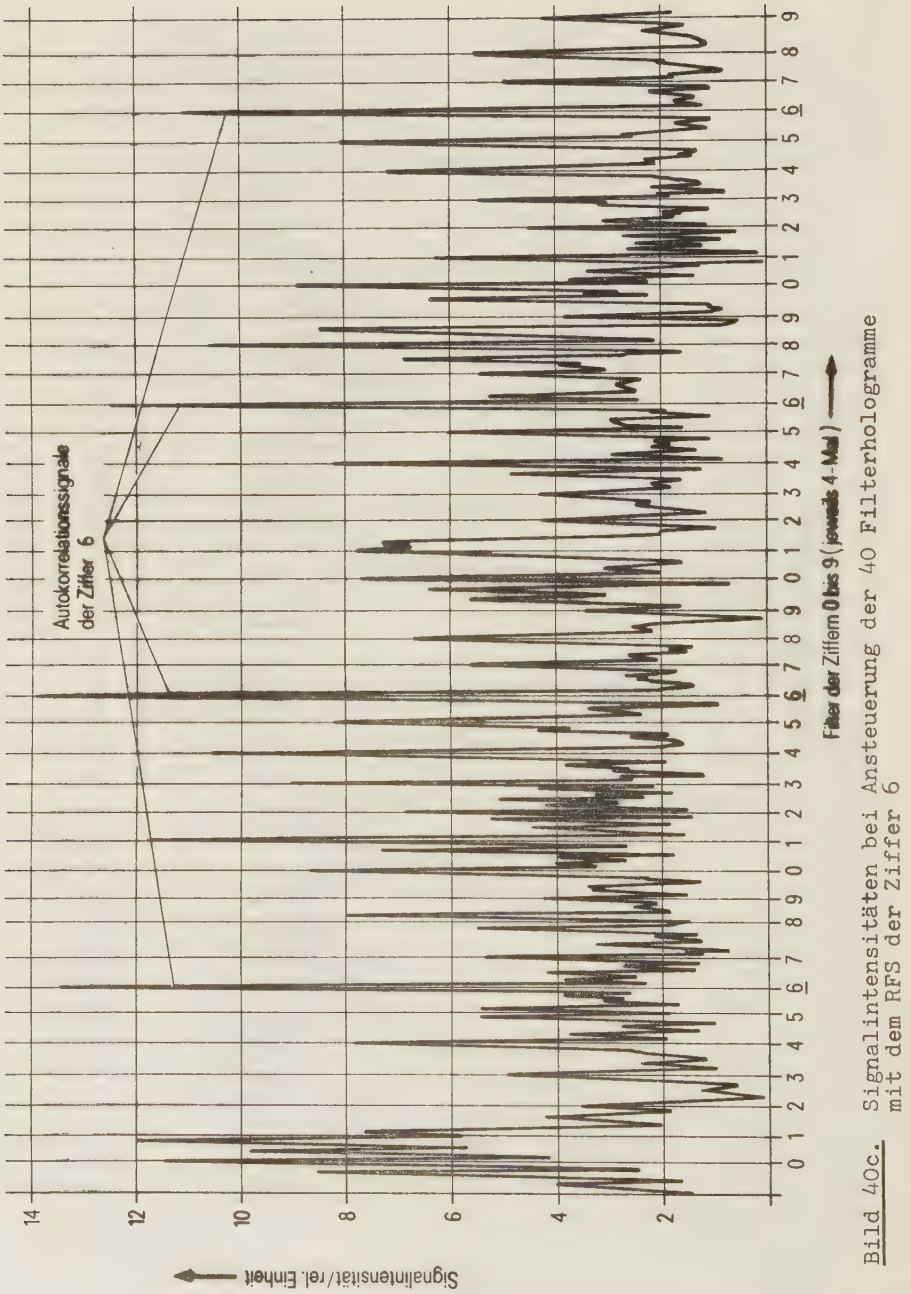


Bild 40c. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 6

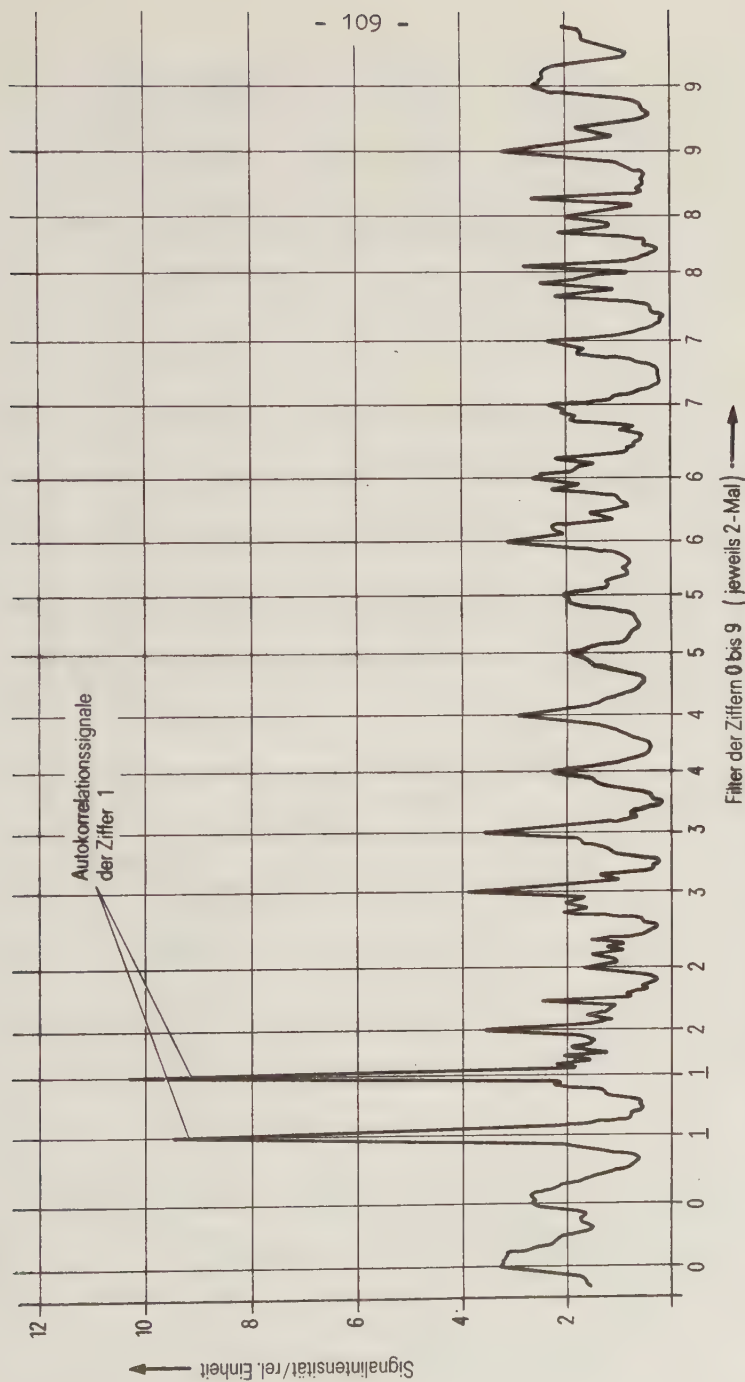


Bild 41a. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 1

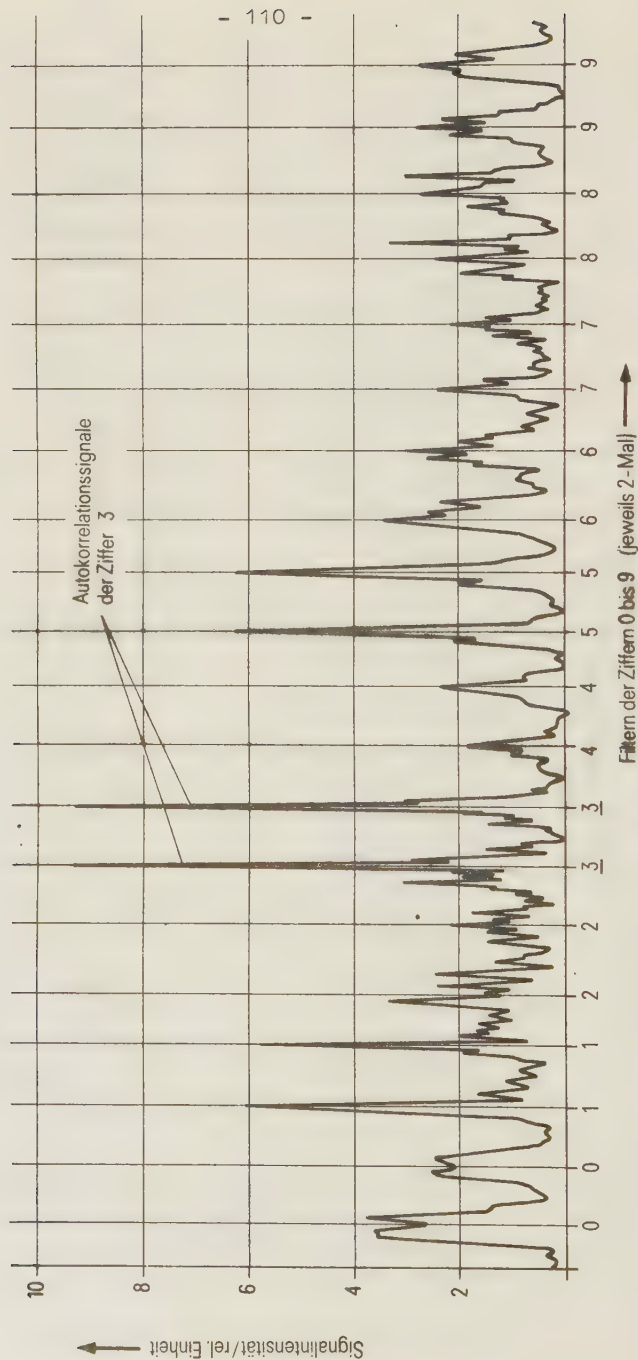
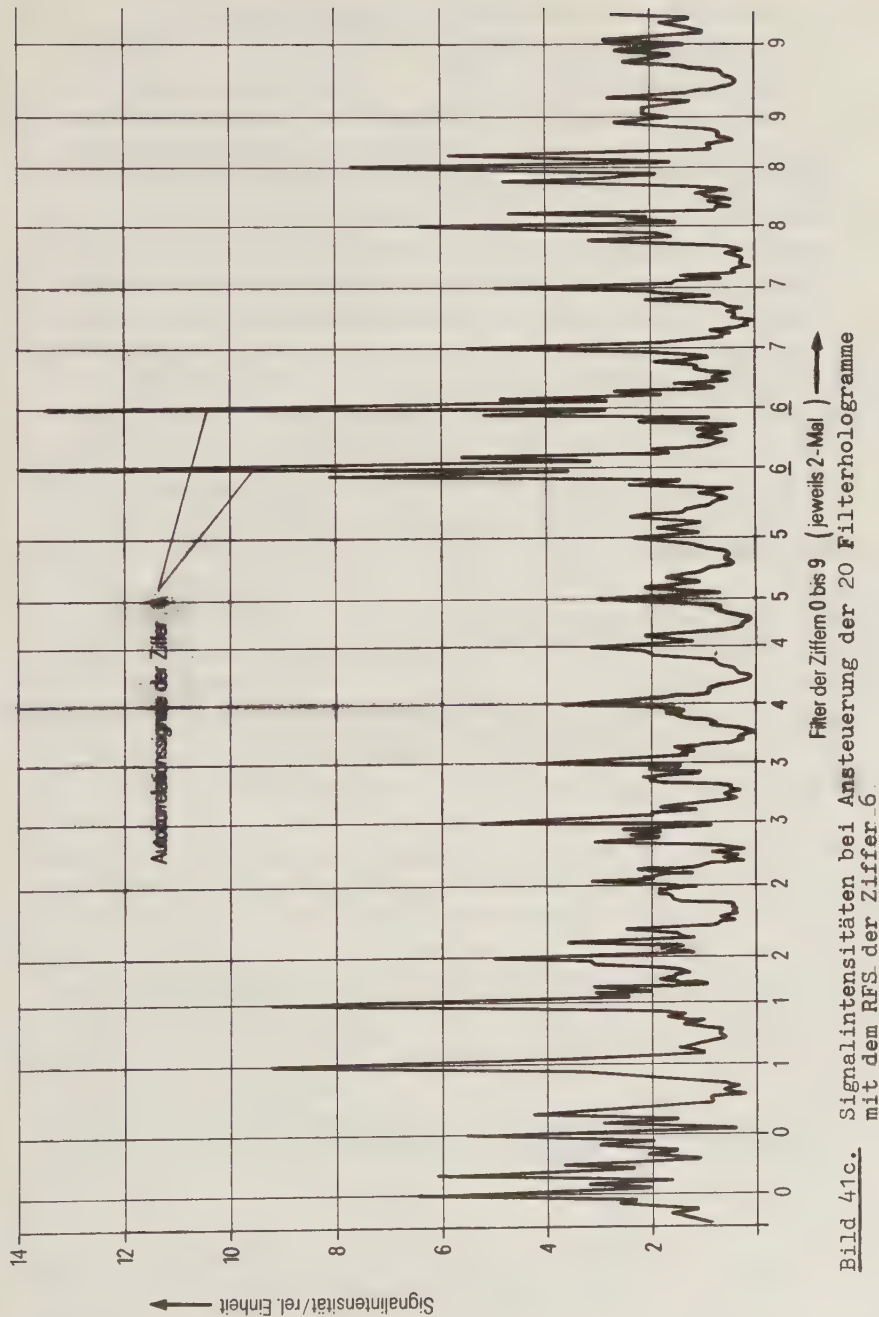


Bild 41b. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 3



6.1.3.3. Sequentieller Vielkanalkorrelator mit höheren Ansteuerungsgeschwindigkeiten

In dieser letzten Phase der Versuche mit Vielkanalkorrelationssystemen wurde zur Rotation des Beleuchtungswellenerzeugers (Keilplatte) die in 4.3.6.2 beschriebene Vorrichtung verwendet, die so dimensioniert war, daß eine höhere Rotationsgeschwindigkeit (ca. 3000 U/min) und damit auch eine höhere Filteransteuerungsgeschwindigkeit (= Anzahl der angesteuerten Filter pro Zeiteinheit) als bisher erreicht werden konnte. Um die Korrelationssignalintensitäten sichtbar zu machen, wurden sie über die Glasfaser (0,15 mm $\varnothing$) des Photometers (vgl. 5.1.2) in einem Photovervielfacher eingekoppelt und die damit erzeugten Lichtstromimpulsfolgen auf dem Oszillographenschirm beobachtet. Die am Beispiel von zehn der OCR-B Normschrift ähnlichen Ziffern (Bild 43) mit Hilfe dieses Systems bei geringem Aufwand erzielten Ergebnisse sind in Bild 42 wiedergegeben. Oberhalb jeder Korrelationssignalfolge sind jeweils auch die dazugehörigen Taktimpulse beider Rückmeldespulen (vgl. 4.3.6.2) wiedergegeben. Der Winkelabstand zwischen den einzelnen Filtern beträgt demnach 20° . Es entspricht nur jedem zweiten Taktimpuls ein Korrelationssignal, weil, zur Vermeidung der Filterüberlagerung, jeder zweite Filterplatz belegt wurde (vgl. 6.1.3.2).

Der Vergleich der Korrelationssignale jeder Signalfolge zeigt, daß, obwohl in allen Fällen die Autokorrelationssignale intensiver als die Kreuzkorrelationssignale sind, die elektronische Unterscheidbarkeit einiger Ziffern, vor allem aber der Ziffern 9, 8 und 5, wegen der geringen Signalunterschiede sehr schwer sein dürfte. Dies ist offensichtlich auf schlechtere Filterqualitäten zurückzuführen, denn die betreffenden Filter liefern im Vergleich zu den übrigen nicht nur geringere Auto-, sondern allgemein auch auffallend geringere Kreuzkorrelationssignalintensitäten; vgl. z.B. die ersten Oszillogramme von Bild 42.

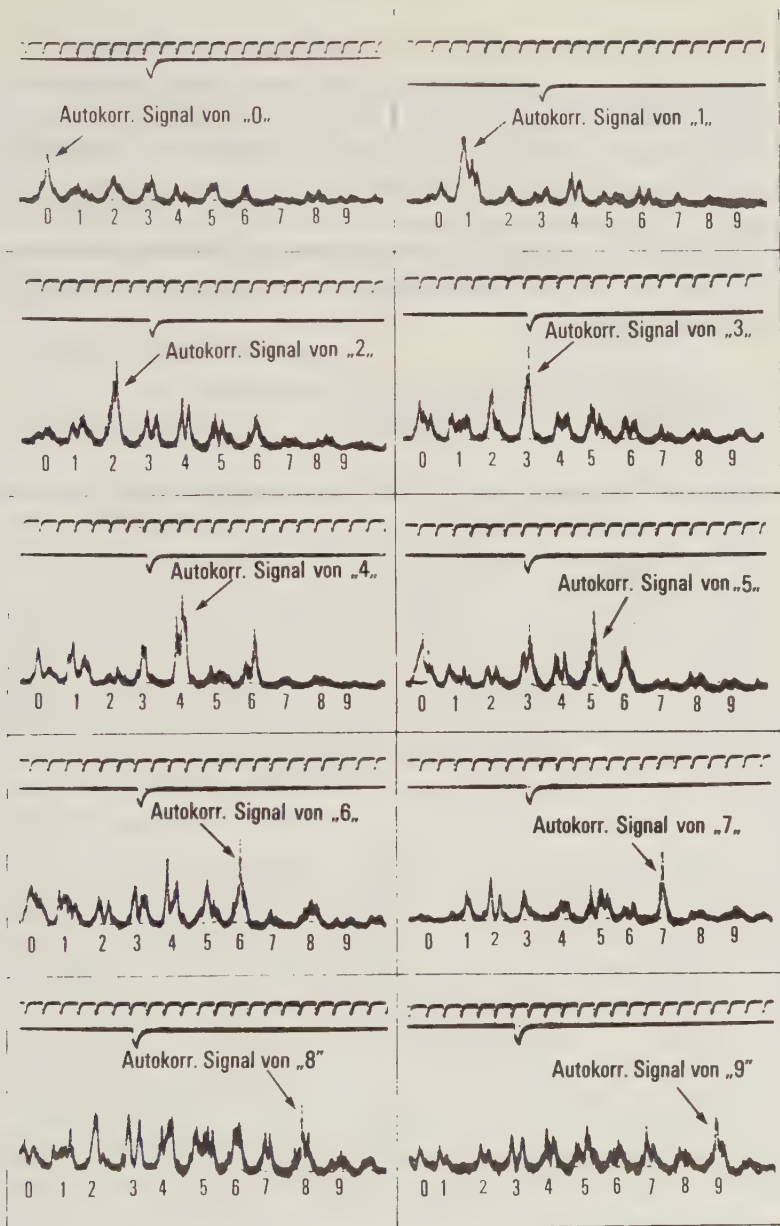


Bild 42. Oszillogramme der Korrelationssignalfolgen, jeweils bei sequentieller Ansteuerung sämtlicher Filter mit dem RFS der Ziffern 0 bis 9

Die im Vergleich zu der guten Ziffernqualität relativ ungünstigen Signalverhältnisse bei den drei zuletzt genannten Filtern stellen jedoch kein grundsätzlich unvermeidliches Hindernis dar, weil sie (bei größerem Aufwand) durch Optimierung der Aufnahmebedingungen der Filterhologramme (vgl. 5.2) sicherlich verbessert werden können. Zu ähnlichen experimentellen Ergebnissen mit Ziffern schlechterer Druckqualität (aus einer Schreibmaschine) kam bei entsprechend größerem Aufwand auch G. Winzer /92/.

6.2. Weitere spezielle Untersuchungsergebnisse

6.2.1. Einfluß von Zeichenfehlern auf das Erkennungssignal

Die bisher für die Durchführung unserer prinzipiellen Untersuchungen verwendeten Zeichen werden in der üblichen elektrischen Zeichenerkennung wegen ihrer einwandfreien Druckqualität als "ideal" bezeichnet. Die in der Praxis zur maschinellen Erkennung vorliegenden Zeichen sind aber von minderer Druckqualität, denn sie besitzen vor allem Fehler, die größtenteils auf die hohen Geschwindigkeiten der Druckgeräte (z.B. ca. 5000 Zeichen/s beim 3211 IBM Kettendrucker) zurückzuführen sind. Weitere Fehlerquellen, die in erster Linie die Randstruktur und den Kontrast der Zeichen verändern, sind der Tintengehalt und der Qualitätszustand der Farbtücher der Druckgeräte. Dejustierte Typenhämmer verursachen weiterhin Zeichenverstümmelungen. Die Kontrastabweichungen der Zeichen vom Idealzustand (100 % Schwärzung) dürfen nach /103/ die bei 35 % festgesetzte Normgrenze nicht unterschreiten. Zur Berücksichtigung aller dieser Fehlerarten, die zu großen Rückweisungs- und Fehlerraten führen, ist deshalb die Entwicklung und der Einsatz immer komplizierterer Systeme erforderlich. Um die maschinelle Zeichenerkennung ohne beträchtliche Einschränkung des visuellen Lesens zu vereinfachen, wurden außerdem Normschriften, wie beispielsweise die OCR- (Optical Character Recognition) Fond A und Fond B (Bild 43) eingeführt /10/.

maschine stammten. In Bild 44 ist als Beispiel eine Auswahl solcher fehlerhafter Zeichen wiedergegeben, die zum Teil bei diesen Meßreihen als Versuchszeichen dienten.

J00000000 P000000000 J0000000002000 P0000000000 A00 000 00 00 00 a	2222222222H 2222222222H 2222222222Y 2222222222J 22H b	333:1111J 33H 33333333333Y 3333333333H 000034333333J c	3456789012H 34567890123Y 78901234567Y 0196798447890J d	0 1 2 3 4 c. 5 6 7 8 9 83579 25964 b. 13284 a. e
--	--	---	---	---

Bild 44. Auswahl fehlerhafter Zeichen zur Ermittlung des Einflusses auf das Erkennungssignal eines holographischen Zeichenerkennungssystems

Sowohl die Signalintensitäten als auch die Intensitäten der Raumfrequenzkomponenten registrierten wir mit dem Scanning-Photometer; vgl. 5.1.2. Diese Messungen waren notwendig, weil sich während der Versuche herausstellte, daß die Intensitäten der Raumfrequenzkomponenten und damit auch die der Korrelations-signale sehr stark von der Qualität der Zeichen beeinflußt werden.

6.2.1.1. Einfluß reeller Zeichenfehler

Als „reell“ werden hier solche Zeichenfehler bezeichnet, die in der Praxis vorkommen können. Die Ursachen dafür sind hauptsächlich, wie eingangs erwähnt (6.2.1), die hohe Druckgeschwindigkeit sowie der Tintengehalt und der Qualitätszustand der Farbbänder. Eine kleine Auswahl derartiger Zeichen, die mit handelsüblichen Lesesystemen einwandfrei gelesen wurden, ist in Bild 44a zusammengestellt. Für die Filterherstellung dienten die im Bild 45 mit * gekennzeichneten Ziffern 0,1,6 und 9. Zuerst wurde das Filter der Ziffer 0 mit dem RFS derselben und der übrigen vier Ziffern der gleichen Zeichenklasse (0) angesteuert. Der registrierte Verlauf der Signalintensitäten ist in der oberen Schreiberkurvenreihe wiedergegeben; die Zugehörigkeit zu den Zeichen ist mit Pfeilen gekennzeichnet.

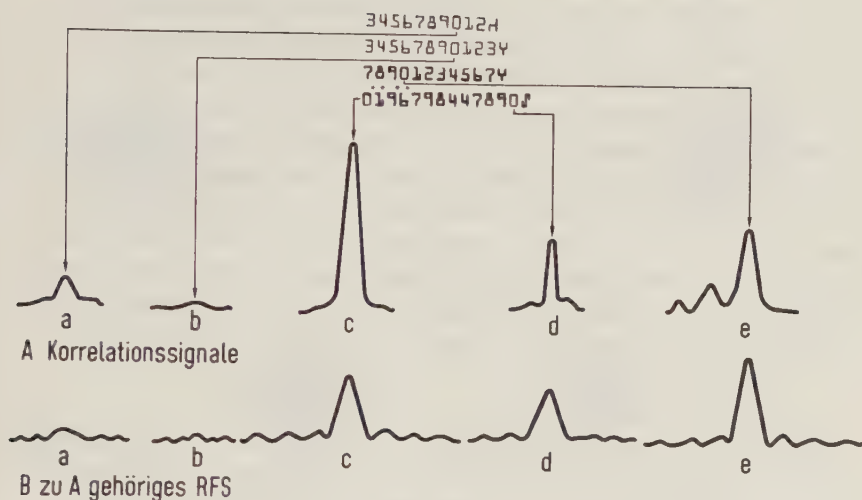


Bild 45. Relativer Intensitätsverlauf A) der Korrelations-
signale bei Ansteuerung des Filters für die Ziffer
O * mit den RFS.n fehlerhafter Ziffern der
gleichen Klasse und B) der RFS.n der Versuchsziffern

Der Vergleich der Korrelationsmaxima zeigt sehr starke Signalunterschiede, die hauptsächlich auf die Druckqualität der Zeichen zurückzuführen sind. Eine andere Fehlerquelle, die auch hier die gemessene Signalintensität beeinflussen könnte, tritt auf, wenn die Zeichen beim Korrelationsprozeß nicht exakt die gleiche Rotationslage besitzen, die das Zeichen bei der holographischen Filteraufnahme hatte. Die nicht genaue Übereinstimmung der Rotationslagen spielt im allgemeinen eine große Rolle, denn das holographische Erkennungsverfahren ist, wie wir in 6.1.2.2.2 gesehen haben, nicht rotationsinvariant. Außer den unterschiedlich großen Signalintensitäten sind auch Abweichungen der Signalbreite vorhanden. Sie führen bei Registrierung der Signalintensitäten mit festen Photodetektoren (vgl. 4.3.4) zu weiteren Problemen.

Das Intensitätsprofil der RFS.n hat, wie die unteren Schreiberkurven in Bild 45 zeigen, einen nahezu analogen Verlauf zu den Schreiberkurven der Korrelationssignale, da zu den großen Korrelationssignalen auch entsprechend hohe Intensitäten der höheren Raumfrequenzkomponenten gehören. Die relativ hohe Intensität des zentralen Beugungsbildes kann weitgehend außer Acht gelassen werden, weil die Intensitätsverhältnisse während der Aufnahme so gewählt wurden, daß die photographische Schicht an diesen Stellen übersteuert werden konnte. Der Signalbeitrag der übersteuerten Bereiche der Filter ist infolgedessen im Verhältnis zur Gesamtsignalintensität niedrig. Messungen haben ergeben, daß dieser Anteil bei derartig übersteuerten Filtern nur ca. 10 % beträgt.

Die Abweichung der Korrelationssignale von den entsprechenden Intensitäten der RFS.n, wie z.B. im Fall c (Bild 45), kann mehrere Ursachen haben. Genannt sei die unterschiedliche Strichbreite (deren Einfluß im nächsten Abschnitt 6.2.1.2 erläutert wird) und die vorher erwähnte Nichtübereinstimmung der Rotationslagen der Zeichen. Die Änderung der Rotationslagen könnte die registrierte Intensität beeinflußt haben, weil der mit dem Detektorspalt abgetastete Bereich der Raumfrequenzebene während der Messungen nicht geändert wurde. Wir wählten diese Art der Abtastung der RFS.n, um Aussagen über die tatsächlichen Intensitätsverhältnisse zu gewinnen, die im Realfall bei Ansteuerung der Filter mit (u.U. verdrehten) Zeichen (bzw. RFS.n) unterschiedlicher Rotationslagen auftreten können.

Der durch diese Methode erfaßte Meßbereich ist im Verhältnis zu der Gesamtfläche des RFS.s relativ klein. Da aber auch an anderen Stellen stichprobenmäßig durchgeführte Intensitätsmessungen zu ähnlichen Meßergebnissen geführt haben, sind diese Intensitätswerte als repräsentativ zu betrachten. Wie die vergrößerten Aufnahmen der gesamten RFS.n der fünf Ver-

suchszeichen (Bild 46) zeigen, beeinflussen die Zeichenfehler auch die örtliche Verteilung der Raumfrequenzkomponenten in der Filterebene.

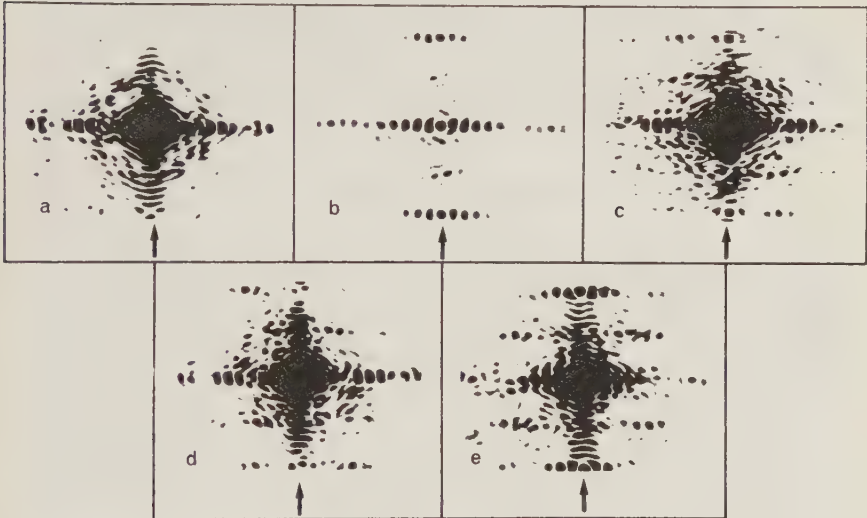


Bild 46. Vergrößerte Ausschnitte des zentralen Bereiches der RFS.n der fünf Versuchszeichen; die Indizierung entspricht der in Bild 45

Die für die Messung der Intensitätsverläufe gewählte Abtastrichtung des Photodetektors ist im Bild 46 jeweils mit einem Pfeil gekennzeichnet. In Bild 47 sind schließlich Form und Abmessung der Fehler vergrößert zu erkennen.

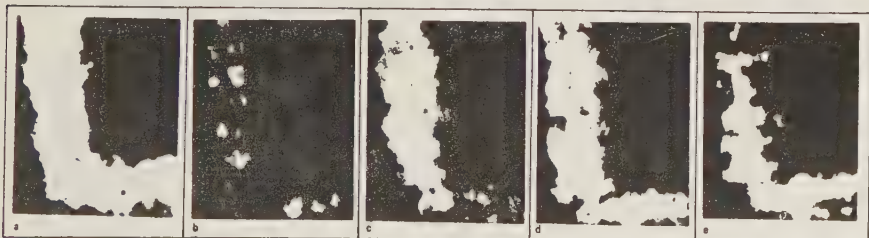


Bild 47. Vergrößerte Ausschnitte der fünf Versuchszeichen

Abgebildet ist immer die gleiche untere Ecke der fünf Vergleichszeichen 0.

Die experimentellen Ergebnisse mit den übrigen Ziffern 1, 6 und 9 (von denen ebenfalls Filterhologramme hergestellt wurden) werden nicht beschrieben, weil die damit festgestellten Verhältnisse sehr ähnlich denen der Ziffer 0 sind.

6.2.1.2. Einfluß von simulierten Zeichenfehlern

Die Leistungsfähigkeit handelsüblicher automatischer Lesegeräte, d.i. vor allem die Lesegeschwindigkeit und die Fehler- und Rückweisungsrate, werden in der Praxis unter anderem auch mit Zeichen ermittelt, die simulierte Fehler aufweisen. Das war auch der Grund, derartige Zeichen in diese Versuchsreihe einzubeziehen. Im Gegensatz zu den reellen Zeichenfehlern besitzen diese Zeichen keine Kontrastunterschiede. Für die Filterherstellung wurde das in Bild 48 mit a gekennzeichnete Zeichen 0 verwendet.

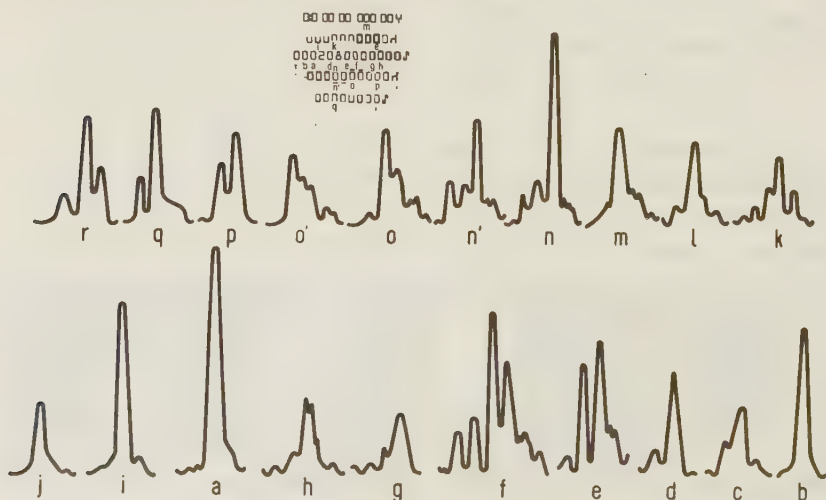


Bild 48. Relativer Intensitätsverlauf der Korrelationssignale bei Ansteuerung des Filters für die mit a gekennzeichnete Ziffer 0 mit den RFS.n der übrigen ebenfalls gekennzeichneten Ziffern

Registriert wurde nur die Signalintensität der indizierten Zeichen.

Der Vergleich der Schreiberkurven, die die Indizes der zugehörigen Zeichen tragen, zeigt neben einer Änderung der Intensität des Hauptmaximums auch größere Abweichungen des Signaldurchmessers. Diese Vergrößerung der Signalfläche kann bei Verwendung fester Photodetektoren zur Messung der Signalintensität sehr nachteilig sein, weil bei optimaler Detektorgröße die tatsächlichen Signale nicht mehr in die Detektorapertur fallen. Die optimale Detektorfläche wird aus der Halbwertsbreite der Autokorrelationssignale¹⁾ (die relativ schmal ist) und aus der Lage der Korrelationssignale in der Detektorebene bestimmt; vgl. 4.3.6.3. Da der Ort der Korrelationssignale von der Lage der Zeichen in der Eingabeebene abhängig ist, wird der Toleranzbereich der zulässigen Zeichenverschiebungen in der Eingabeebene eingeengt. Durch Messungen mit dem Photodetektor (Glasfaser) wurde festgestellt, daß bei Verschiebungen der Zeichen um 0,3 mm von der Sollage die Signalintensität bis maximal 7 % schwankt. Größere Verschiebungen sollten dagegen vermieden werden, weil die Signalintensität außerhalb dieses Toleranzbereiches drastisch abnimmt /104/.

Obwohl im Fall der simulierten Fehler auch die niedrigsten Signale höher sind als die entsprechenden Signale im Fall der reellen Fehler, ist auch hier eine eindeutige Zuordnung der Zeichen zur Zeichenklasse 0 nicht möglich, weil es Signale von Zeichen anderer Klassen gibt, die intensiver sind. Der Unterschied zwischen den Kurven n und n' bzw. o und o' besteht darin, daß bei der Registrierung der Kurven n und o für den Korrelationsprozeß auch der unterhalb bzw. oberhalb der Zeichen vorhandene Strich in die Eingabeapertur fiel. Diese Störung beeinflußt also ebenfalls merklich die Signalintensität.

¹⁾ Als „Autokorrelationssignal“ wird allgemein nicht nur das Signal bezeichnet, das sich bei Ansteuerung des Filterhologramms mit dem RFS des Zeichens ergibt, das für die Filterherstellung verwendet wurde, sondern auch solche Signale von Zeichen, die der gleichen Zeichenklasse angehören.

Die in Bild 49 wiedergegebenen Intensitätskurven eines geringeren, jedoch repräsentativen Teiles der RFS.n der indizierten Vergleichsziffern zeigen ebenfalls keinen identischen Verlauf sowohl des zentralen Beugungsbildes als auch der (im Zusammenhang mit Hochpaßfiltern) interessierenden höheren Raumfrequenzkomponenten.

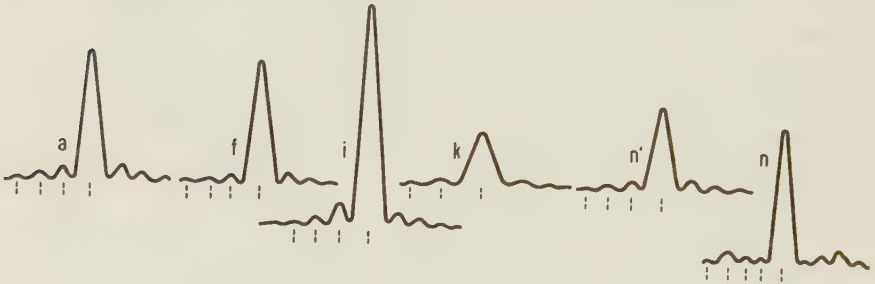


Bild 49. Auswahl aus den Intensitätsverläufen der Raumfrequenzkomponenten der Ziffern 0 aus dem Bild 48

Zwischen diesen Kurven ist nicht nur eine Änderung der Intensitätsverhältnisse von Haupt-zu-Nebenmaxima, sondern auch ein unterschiedlicher Abstand zwischen den Maxima der höheren Raumfrequenzkomponenten zum Maximum des zentralen Beugungsbildes festzustellen. Diese Abstände, die ebenfalls die Größe des Erkennungssignales beeinflussen, sind auf die unterschiedliche Strichbreite der Zeichen zurückzuführen. Dieser Zusammenhang läßt sich durch die bekannte Näherungsgleichung der Fraunhoferschen Beugung an einem Spalt beschreiben; vgl. 3.1.

Bild 46 entsprechend, enthält Bild 50 vergrößerte Aufnahmen der gleichen RFS.n, die zur Registrierung der Intensität der Raumfrequenzkomponenten verwendet wurden.

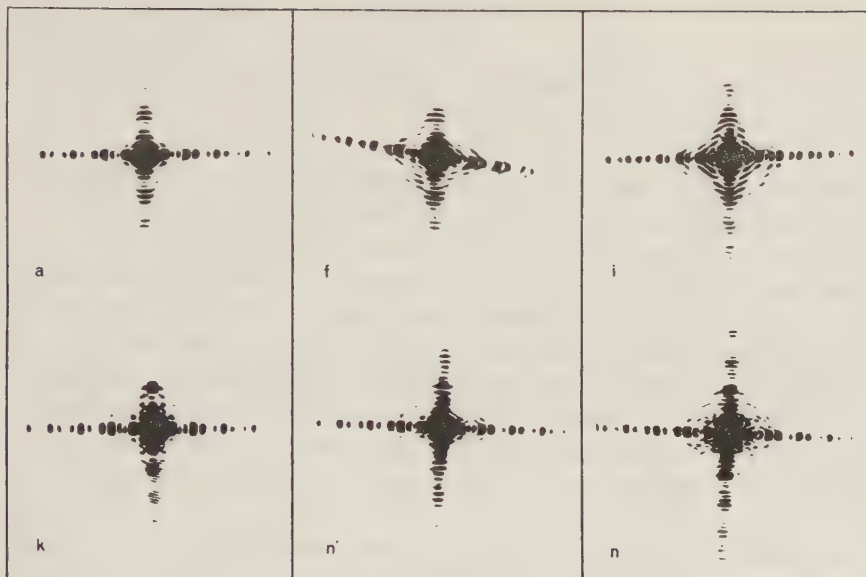


Bild 50. Vergrößerte Ausschnitte des zentralen Bereiches der RFS.n der Ziffern 0, deren Intensität in Bild 49 wiedergegeben ist

Die Indices der Aufnahmen stimmen mit denen der Schreiberkurven überein. Auf die mikroskopischen Aufnahmen der Zeichen selbst wurde verzichtet, weil ihre Randstruktur gleichmäßiger, d.h. „fehlerfrei“ ist. Die örtlichen Unterschiede der Lichtverteilungen in der Raumfrequenzebene sind trotz merklicher Signalabweichungen nicht so stark wie im Fall der reellen Zeichenfehler.

Versuchsergebnisse mit simulierten Fehlern an Ziffern anderer Zeichenklassen werden nicht behandelt, weil sie keine grundsätzlich anderen Ergebnisse lieferten.

6.2.1.3. Einfluß der Randfeinstruktur maschinen- geschriebener Zeichen

Nachdem wir in den beiden vorhergehenden Abschnitten einmal den Fall reeller Zeichenfehler mit sehr starken Fehlern in der Randstruktur und mit Unterschieden des Kontrastes und der Strichbreite und zum anderen den Fall simulierter Fehler mit gleichmäßiger Randstruktur und sonst ebenfalls starken Abweichungen der Strichbreite behandelt haben, werden im folgenden Meßergebnisse beschrieben, die mit einer kleineren Auswahl von Ziffern erhalten wurden, die mit unbewaffnetem Auge keine Unterschiede zeigen. Nach der oben erwähnten Definition handelt es sich also um sog. „ideale“ Zeichen.

Die Versuchsziffern sind in Bild 44e wiedergegeben und stammen aus einer gewöhnlichen Schreibmaschine (Adler electric 151 f). Wegen der großen Ähnlichkeit der Meßergebnisse verschiedener Zeichenklassen wird auch hier nur der Einfluß der Randstruktur auf das Erkennungssignal anhand der Ziffern der Zeichenklasse 2 diskutiert. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Fällen wurde hier von jeder Ziffer ein eigenes Filterhologramm hergestellt und das Korrelationssignal sämtlicher Vergleichsziffern mit allen Filtern registriert.

Die Intensitätsunterschiede der Korrelationssignale sind, wie in Bild 51 zu erkennen ist, überraschend groß. In den Blöcken A, B und C sind im linken Teil des Bildes jeweils die drei Korrelationssignale $a_{1,2,3}$, $b_{1,2,3}$ und $c_{1,2,3}$ zusammengefaßt, die bei Ansteuerung der Filterhologramme der Ziffern 2_a bzw. 2_b bzw. 2_c (Bild 44e) mit den Vergleichsziffern erhalten wurden. Rechts im Bild sind die zugehörigen Intensitäten der RFS.n wiedergegeben.

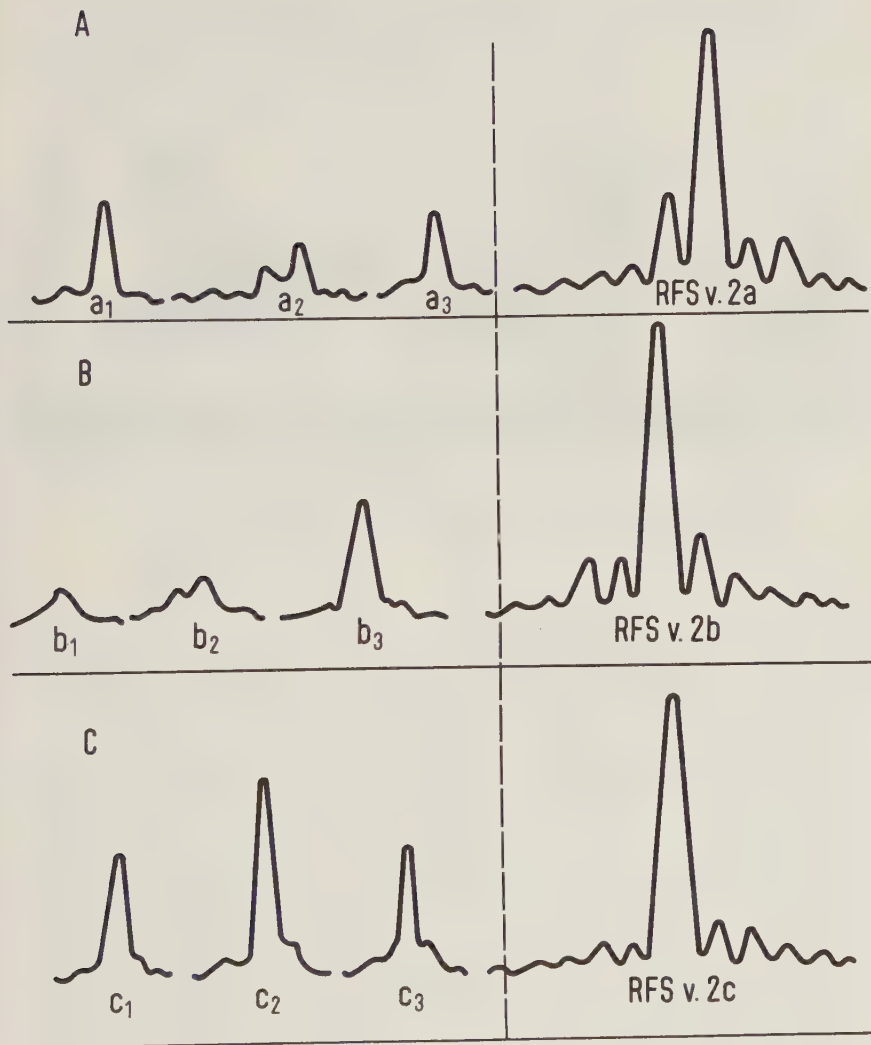


Bild 51. Relative Intensitätsverläufe der Korrelations-
signale (links) und der RFS.n (rechts) von drei
mit einer Schreibmaschine geschriebenen Ziffern
der Klasse 2

Nachdem weder bei gewöhnlicher Betrachtung der Ziffern noch beim Vergleich der vergrößerten Aufnahmen ihrer RFS.n (Bild 52) nennenswerte Unterschiede festgestellt werden können, sind die Signalabweichungen hauptsächlich auf die Feinstruktur des Zeichenrandes und auf die damit zusammenhängenden Intensitäten der höheren Raumfrequenzkomponenten zurückzuführen.

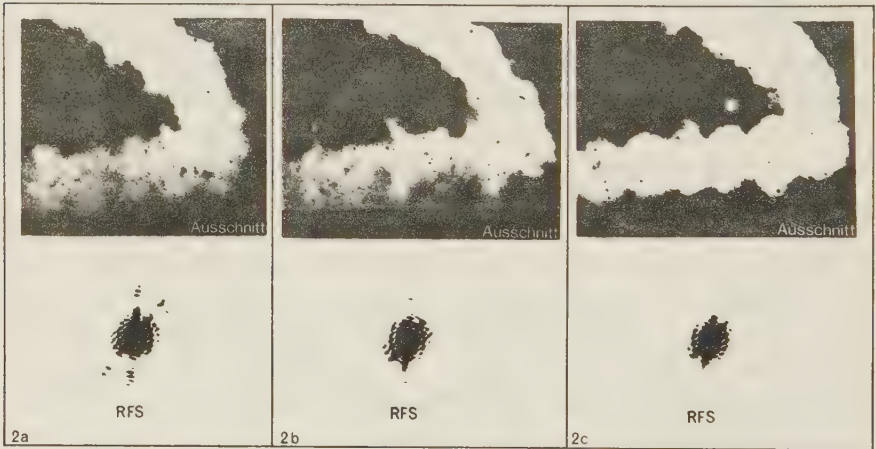


Bild 52. Vergrößerte Ausschnitte der drei Versuchsziffern 2 (oben) und deren RFS.n (unten)

Die Feinstrukturunterschiede sind, wie die mikroskopisch vergrößerten Aufnahmen der unteren Ecken der drei Vergleichszeichen in Bild 52 zeigen, relativ groß und statistisch verteilt. Ein Einfluß der Rotationslage der Zeichen auf die gemessenen Korrelationssignale (Bild 31) ist hier nicht zu erwarten, weil die Zeichen (ohne Änderungen) mit der gleichen Maschine geschrieben wurden. Der Intensitätsunterschied zwischen den Signalserien A, B und C liegt vor allem darin, daß die drei Filter qualitätsmäßig nicht identisch waren.

Der Einfluß der Randstruktur auf die örtliche Lichtverteilung und auf die Intensität der Raumfrequenzkomponenten ist auch beim Vergleich der Aufnahmereihe A und B in Bild 53 deutlich erkennbar.

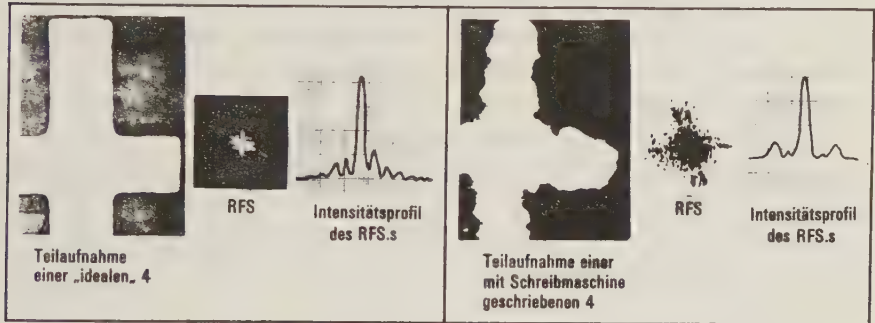


Bild 53. Vergrößerte Ausschnitte, links einer „idealen“ und rechts einer mit Schreibmaschine geschriebenen Ziffer 4 mit dazugehörigen RFS.n und deren Intensitätskurven

In Bild 53 sind vergrößerte Ausschnitte sowohl einer zuerst im Großformat gezeichneten und anschließend verkleinerten Ziffer 4 als auch einer mit Schreibmaschine geschriebenen 4 dargestellt. In der Mitte sind jeweils die RFS.n der vollständigen Zeichen und rechts die dazugehörigen photometrisch registrierten Intensitätskurven von gleichen Bereichen der beiden RFS.n wiedergegeben. Während im RFS des idealen Zeichens stark ausgeprägte Richtungen und charakteristische Regelmäßigkeiten der Anordnung der Raumfrequenzkomponenten zu beobachten sind, treten diese Erscheinungen im RFS des anderen Zeichens stark zurück. Die Raumfrequenzkomponenten des zeichnerisch hergestellten Zeichens sind außerdem trotz der gleichen Aufnahmebedingungen merklich intensiver. Dieses Verhalten wird auch durch den Verlauf der jeweils rechts wiedergegebenen Intensitätskurven der gleichen Bereiche der RFS.n bestätigt.

6.2.1.4. Schlußbemerkungen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen experimentellen Ergebnisse beziehen sich auf eine geringe Anzahl fehlerhafter Ziffern der Zeichenklassen 0 und 2. Untersuchungsergebnisse mit Ziffern anderer Zeichenklassen führten prinzipiell zu gleichen Aussagen. Da andererseits die hier behandelten Fehlerarten repräsentativ für die in der Praxis vorkommenden Zeichenfehler sind, ist der Einfluß derartiger Fehler auch auf die Signale von Zeichen anderer Zeichenklassen übertragbar.

6.2.2. Einfluß der Photoschichtdicke der Filterhologramme auf das Erkennungssignal

Bei den bisherigen Betrachtungen (zur holographischen Zeichenerkennung) ist immer davon ausgegangen worden, daß die Lichtintensität der Korrelationssignale - bei sonst gleichen Bedingungen - unabhängig von Zeichenverschiebungen in der Objektebene ist. Das ist jedoch nicht uneingeschränkt der Fall, da mit den Zeichenverschiebungen in der Objektebene sich auch der Winkel ändert, unter dem das RFS des zu erkennenden Zeichens mit dem Filterhologramm korreliert. Wegen der endlichen Dicke der photographischen Schicht ist deshalb aufgrund des Bragg-Effektes eine Abhängigkeit der Lichtintensität des Korrelationssignals vom Einfallswinkel der RFS.n auf das Filterhologramm zu erwarten. Die Dicke der Photoschicht bestimmt andererseits die Speicherkapazität /78/, die allgemein in der Holographie eine große Rolle spielt.

Zur Ermittlung dieses Einflusses haben wir¹⁾ auch die Anordnung gemäß Bild 4 verwendet. Eine Verschiebung des Objektes um 25 mm entspricht in diesem System einer Winkeländerung von ca. 3° .

¹⁾ Dr.J. Shamir /104/ hat dabei zur theoretischen Interpretation dieses Effektes beigetragen und mich teilweise bei den Messungen unterstützt.

Als Zeichen wurden die Buchstaben A und O verwendet, die sich in ihrer Form wesentlich unterscheiden. Die erforderliche Konstanz der Beleuchtungsintensität wurde jeweils durch den kontinuierlich verstellbaren Strahlteiler ermöglicht. Die experimentellen Ergebnisse für die Buchstaben A und O sind im Bild 54a bzw. 54b graphisch dargestellt.

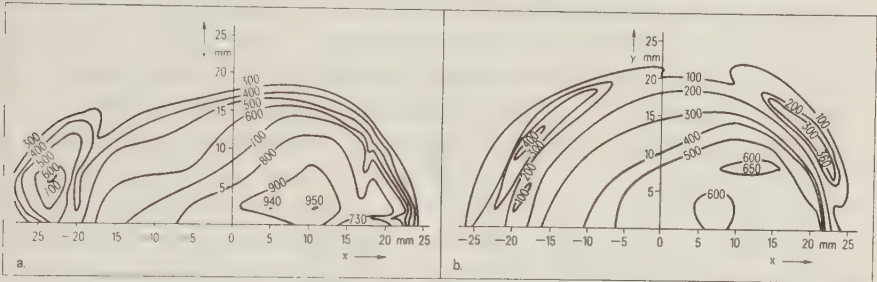


Bild 54. Linien gleicher Signalintensität in Abhängigkeit von der Lage a) des Buchstabens A und b) des Buchstabens O in der Objektebene des holographischen Zeichenerkennungssystems

Die Ausgangslage ($x=y=0$) entsprach dem Zentrum der Beleuchtungswelle, das mit der optischen Achse des Systems zusammenfiel. An der gleichen Stelle befanden sich die Buchstaben auch bei der Filterherstellung. Aus technischen Gründen konnten sie bei diesem ersten Versuch nur in eine Hälfte der Objektebene verschoben werden.

Der Vergleich der Linien gleicher Intensität (Isophoten) zeigt eine relativ große Abhängigkeit der Autokorrelationssignalintensität von der Objektlage. In einzelnen Fällen reichen sogar Objektversetzungen von nur 8 mm aus, um eine Verringerung der Signalintensität um den Faktor 5 zu bewirken. Diese Abhängigkeit ist außerdem nicht monoton und im zentralen Bereich in der y-Richtung im allgemeinen größer als in der x-Richtung. Eine gewisse Symmetrie ist nur um die x-Achse zu erkennen. Diese starke Unregelmäßigkeit der Signalintensität und vor allem die Verschiebung des Autokorrelationsmaximums sind wahrscheinlich auf Schrumpfungen der Photoschicht /71/ zurückzuführen.

Das Ausmaß derartiger Einflüsse kann jedoch nicht leicht festgestellt werden. Vergleicht man zusätzlich die Intensitätsverteilungen der Korrelationssignale beider Buchstaben, so ist beim Buchstaben O eine ausgeprägtere Symmetrie vorhanden als beim A. Dies ist anscheinend auf den besseren Symmetriegrad des RFS.s (und damit des Filters) des Buchstabens O zurückzuführen.

Diese starken Signalintensitätsschwankungen in Abhängigkeit von der Objektlage sind mit einer zusätzlichen und nicht minder starken flächenhaften Änderung der Signalform verbunden.

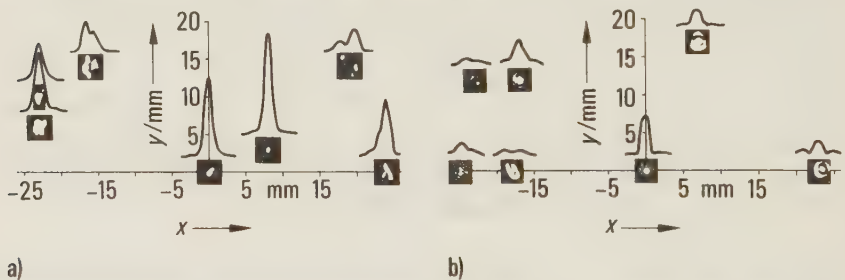


Bild 55. Intensitätskurven und Aufnahmen zur Signalintensitätsverteilung in der Detektorebene in Abhängigkeit von der Lage a) des Buchstabens A und b) des Buchstabens O in der Objektebene des holographischen Zeichenerkennungssystems

Die Signale wurden vom Fernsehschirm photographiert und sind in beiden Bildern an den korrespondierenden Stellen der Buchstaben in der x-y-Ebene wiedergegeben. Jeder Aufnahme ist jeweils die photometrisch registrierte Schreiberkurve der Korrelationssignale zugeordnet. Die Intensität wurde in der Detektorebene nur in einer Richtung so registriert, daß das Intensitätsmaximum miterfaßt werden konnte.

Die hier beschriebenen experimentellen Ergebnisse haben eine relativ starke Abhängigkeit sowohl der Intensität als auch der Form der Autokorrelationssignale von der Zeichenlage in der Objektebene gezeigt. Diese Abhängigkeit, die den Einsatz holographischer Zeichenerkennungssysteme zusätzlich erschwert, ist auf die endliche Dicke, d.h. auf den sog. „Volumeneffekt“ (vgl. auch /105/) und auf Schrumpfungen der für die Filterherstellung verwendeten Photoschicht (Agfa Scientia 10 E 75) zurückzuführen. In /89/ wurde außerdem gezeigt, daß bei größeren Zeichenverschiebungen der Entstehungsort der Korrelationssignale sich nicht mehr linear mit dem Zeichenabstand zur optischen Achse ändert. Eine teilweise oder vollständige Unterdrückung der Schrumpfungen wäre durch eine aufwendige chemische Behandlung der Photoemulsion nach der Belichtung möglich /71/. Eine weitere Verbesserung der Signalverhältnisse könnte weiterhin durch Verwendung von dünneren Photoschichten /106/, durch den Einsatz geeigneterer Linsensysteme oder auch durch die Auswahl geeigneter Bedingungen bei der Filterherstellung erreicht werden.

6.2.3. Einsatzmöglichkeit von thermoplastischen Materialien als Direktzeitwandler bei der kohärentoptischen Zeichenerkennung

Eine weitere und ebenfalls sehr wichtige Forderung, die zum erfolgreichen Einsatz holographischer oder allgemein kohärent-optischer Informationsverarbeitungssysteme erfüllt sein muß, ist, daß die Objektinformation in transparenter Form vorliegen soll. Diese Forderung, die wir bisher nur kurz erwähnt haben, wurde bei unseren grundsätzlichen Untersuchungen hauptsächlich durch die aufwendige und unrationelle Übertragung der Information auf weitgehend störungsfreie photographische Materialien (Filme, Photoplatten) berücksichtigt. Nur in wenigen Sonderfällen (z.B. 6.1.2 und 6.2.1) verwendeten wir zur besseren Unterdrückung von Materialeinflüssen zusätzlich optisch polierte planparallele Glasküvetten mit Immersionsflüssigkeiten (Wasser oder Zedernholzöl). Die direkte kohärentoptische Informations-

verarbeitung aus üblichen Zeichenträger, z.B. Papier, ist nicht möglich, weil deren ungleichmäßige Oberflächenrauigkeit eine störende Phasenmodulation des Laserstrahles verursacht, die das Nutzsignal vollständig überdecken kann /107-108/.

Eine Möglichkeit zur Direktzeitwandlung ist prinzipiell beispielsweise durch die sog. „TITUS“-Röhre /99/ gegeben. Sie konnte aber nach unserem Wissen bis jetzt noch nicht erfolgreich eingesetzt werden; offenbar sind ihre technologischen Probleme noch nicht gelöst. Andere Verfahren, die sich noch im Experimentierstadium befinden, sind in /109/ angegeben. Die Direktzeitwandlung in der kohärentoptischen Informationsverarbeitung ist deshalb nach wie vor problematisch.

Im folgenden wird eine Anordnung beschrieben, in der die Funktion des Direktzeitwandlers von thermoplastischen Materialien übernommen werden soll. Weiterhin wird über erste experimentelle Ergebnisse mit derartigen Materialien zur holographischen Zeichenerkennung berichtet.

6.2.3.1. Zum Prinzip der Direktzeitwandlung mit thermoplastischen Materialien

Thermoplastische Materialien sind in der Holographie vor allem durch ihre mögliche Verwendung als löschbare Speichermaterialien, d.h. als löschbare Hologramme, bekannt geworden /110/. In der letzten Zeit wurden wesentliche Verbesserungen ihrer Eigenschaften erzielt /111,112/. Der Speichervorgang erfolgt dadurch, daß die Materialien, die auf photoleitende und transparente Träger (Filme) aufgebracht sind (Bild 56), durch Korona-Entladung aufgeladen, anschließend belichtet und durch Erwärmung entwickelt werden. Durch die Belichtung wird der Photoleiter nur an denjenigen Stellen leitend, wo Licht aufgefallen ist. Das hat zur Folge, daß die negativen Ladungen durch den Photoleiter bis zur Grenzfläche des thermoplastischen Materials ge-

langen. Durch die anschließende Erwärmung (Entwicklung) verursachen die elektrostatischen Kräfte eine Deformation des Oberflächenprofils, die proportional zur Ladungsverteilung, d.h. zur Belichtungsintensität ist.

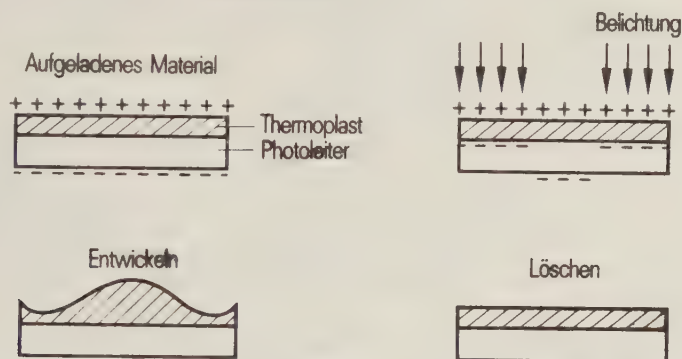


Bild 56. Einschreib-Lösch-Zyklus von Informationen auf thermoplastische Materialien (wichtigste Schritte)

Das Löschen der eingeschriebenen Information geschieht durch Erwärmung des Materials über einen bestimmten Wert. Nach dem Löschen kann der Einschreib-Lösch-Zyklus mehrmals wiederholt werden.

Mit Hilfe thermoplastischer Materialien ließe sich nun eine einfache Vorrichtung zur Direktzeitwandlung der Zeicheninformation in die gewünschte transparente Form realisieren. Der prinzipielle Aufbau einer derartigen Vorrichtung ist schematisch in Bild 57 dargestellt. Die Zeicheninformation (im Bild 57 mit „Zeichenvorlage“ bezeichnet) wird neben den Korrelator in der Höhe der Eingabeebene (3) episkopisch abgebildet (s. Bildebene in Bild 57). Mit dieser Lichtverteilung der Bildinformation wird dann ein an dieser Stelle angebrachtes thermoplastisches Filmmaterial, das sensibilisiert ist, belichtet.

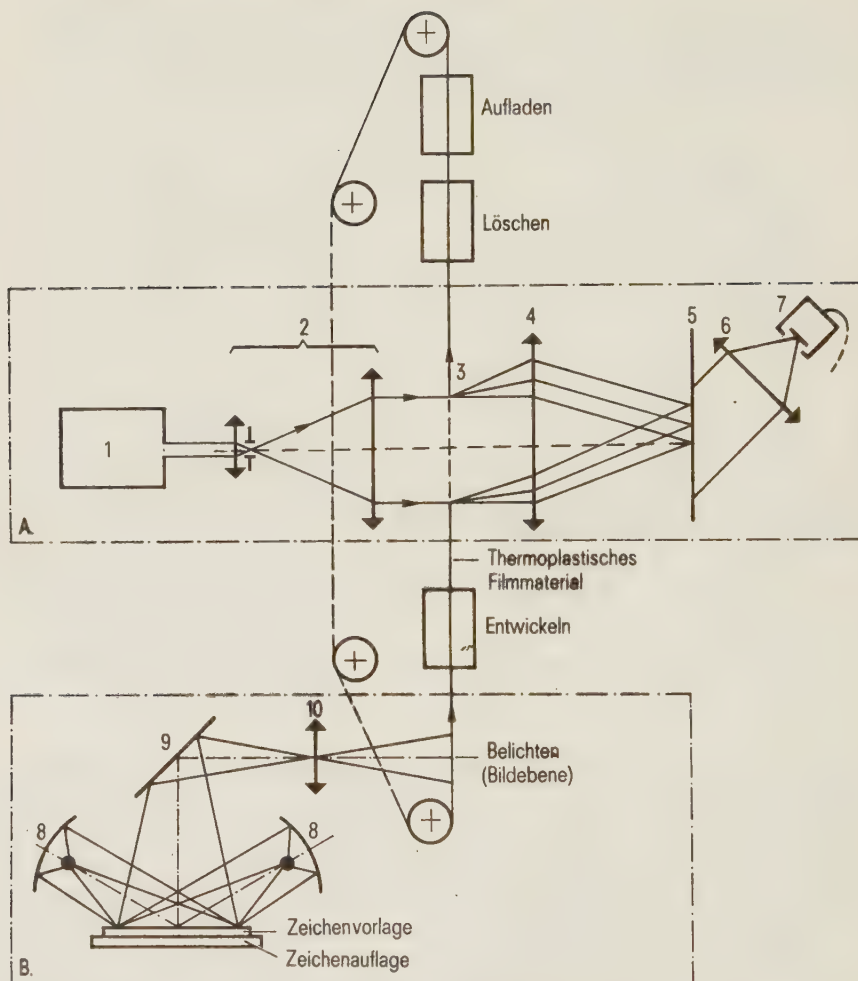


Bild 57. Prinzipieller Aufbau eines kohärentoptischen Zeichenerkennungssystems mit thermoplastischem Filmmaterial als Direktzeitwandler.

A) Zeichenerkennungssystem:
 1 Laser, 2 Aufweitungssystem, 3 Objektebene,
 4 Transformationslinse, 5 Filterebene, 6 Sammellinse,
 7 Detektor

B) Optische Übertragung der Zeicheninformation auf das thermoplastische Material:
 8 Lichtquellen mit Hohlspiegeln, 9 Planspiegel,
 10 Projektionsobjektiv

Der so belichtete Film wird zuerst mit einer Transportvorrichtung in die nächste Station gebracht und entwickelt und anschließend in die Zeicheneingabeebene 3 des Korrelators weitertransportiert. An dieser Stelle liegt nun die Zeicheninformation als Phasenobjekt in transparenter Form vor und kann nach einem der bekannten Verfahren kohärentoptisch verarbeitet werden. Nach Beendigung des Lesevorgangs wird die eingeschriebene Information in der nächsten Station der Anlage gelöscht. Das thermoplastische Material kann dann für einen neuen Einschreib-Lösch-Zyklus wiederverwendet werden. In der letzten Zeit konnte die Zyklenzahl bis auf ca. 10000 erhöht werden /113/; eine weitere Verbesserung dieser Materialeigenschaft ist prinzipiell möglich.

Die Rückführung des thermoplastischen Films in die Ausgangslage kann so geschehen, daß die Strahlengänge des Korrelators und der episkopischen Abbildung nicht behindert werden, wenn der Film in Form eines endlosen Bandes durchläuft. Dies ist in Bild 57 durch die gestrichelte Linie angedeutet. Eine andere Möglichkeit für die Eingabe des thermoplastischen Filmmaterials im Korrelator, die die begrenzte Zyklenzahl berücksichtigt, liegt z.B. im Einsatz von größeren Speicherrollen, die nach n-maligem Gebrauch zu ersetzen sind (n =Zyklenzahl).

Die im jetzigen Forschungsstadium gültigen Zeiten der einzelnen Schritte eines Einschreib-Lösch-Zyklus sind nach /114/:

Aufladen: 1 s bis 3 s,

Belichten: 1/100 s bis 1 s (je nach Lichtintensität),

Entwicklung und Löschen:
jeweils ca. 300 ms bis 3 s.

Die relativ langen Zeiten für das Aufladen, Entwickeln und Löschen können durch Verlängerung der Wege, die das Filmmaterial in den entsprechenden Stationen zurücklegen muß, kompensiert werden. Dadurch tritt eine Verzögerung zwischen Zeicheneingabe und -erkennung ein; sie bedeutet jedoch keine Reduzierung der Lesegeschwindigkeit.

6.2.3.2. Experimentelle Ergebnisse

In dem bisher verwendeten holographischen Korrelator (Bild 4) haben wir erste Versuche über die Brauchbarkeit der thermoplastischen Materialien als Direktzeitwandler durchgeführt. Als Versuchszeichen dienten zuerst nur Ziffern aus der Schreibmaschine 151 f der Firma Adler. Die Übertragung der Zeicheninformation auf das thermoplastische Material wurde freundlicherweise mit einem einfacheren Aufbau von Herrn Dr. Moraw¹⁾ bei der Firma Kalle AG, Wiesbaden, durchgeführt. Da es sich hier um einen Prinzipversuch handelte, wurde für die Filterherstellung nur das RFS der eingekreisten Ziffer 4 aus dem Ziffernfeld verwendet, das in Bild 58 abgebildet ist. Die Korrelationssignale, deren Intensitätsverläufe ebenfalls in Bild 58a wiedergegeben sind, wurden wie bisher mit der Glasfaser des Photometers abgetastet und mit dem Schreiber registriert. Die Intensitätsverläufe entsprechen jeweils den mit Pfeilen angezeigten Ziffern der gleichen Klasse 4.

Die relativ geringen Schwankungen der maximalen Werte der Autokorrelationssignale sind in erster Linie einerseits auf die Qualität der Ziffern- sie konnten wegen des provisorischen Aufbaus der Anlage zur Übertragung der Zeicheninformation auf das thermoplastische Material nicht über die ganze Fläche gleichmäßig hergestellt werden - und andererseits auf Inhomogenitäten des thermoplastischen Trägermaterials zurückzuführen.

Die Schreiberkurven in Bild 58b geben zusätzlich die Intensitätsverläufe der Korrelationssignale (Kreuz-) wieder, die bei Ansteuerung des gleichen Filterhologramms (der Ziffer 4) mit den RFS.n der mit Pfeilen gekennzeichneten Ziffern 1,2,3, 5 und 6 entstanden sind. Der Vergleich der maximalen Intensitätswerte der Autokorrelationssignale (Bild 58a) und der Kreuzkorrelationssignale zeigt, daß die Signalabstände mit den

¹⁾ Herrn Dr. Moraw sei dafür auch an dieser Stelle gedankt.

bisher bei Verwendung von photographischen Platten und Filmmaterialien (als Zeichenträger) erzielten Abständen vergleichbar sind.

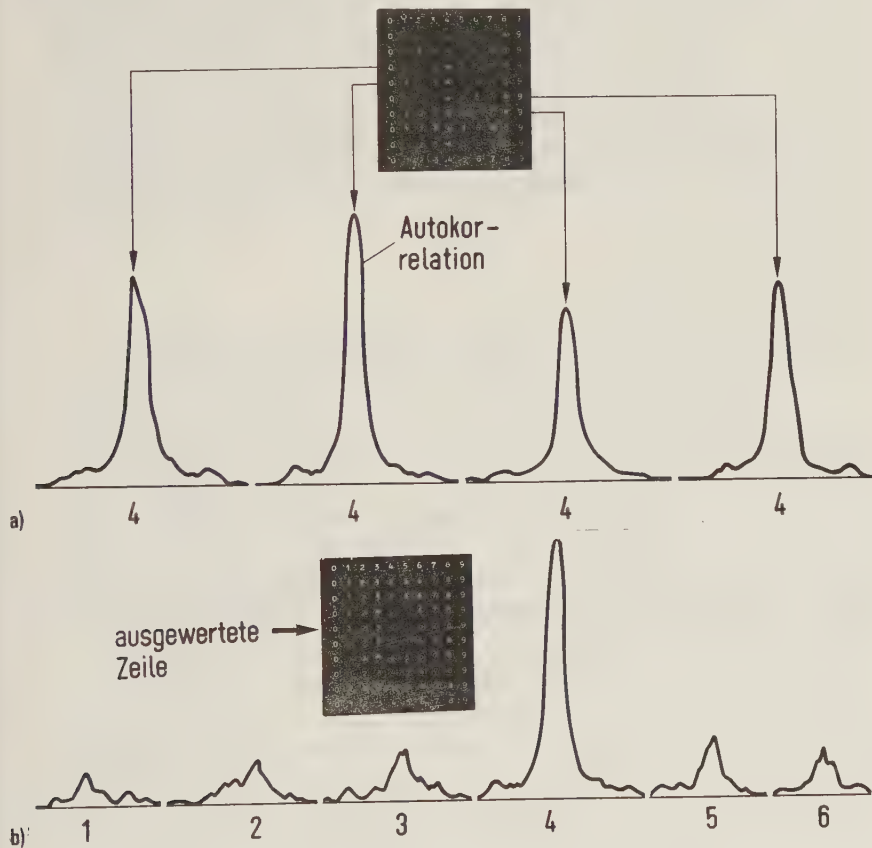


Bild 58. Intensitätskurven der Korrelationssignale bei Ansteuerung des Filters für die Ziffer 4 mit den RFS.n a) von sich selbst und drei weiteren Ziffern der gleichen Klasse (Autokorrelationssignale) und b) der Ziffer 4, die für die Filterherstellung verwendet wurde, und den Ziffern 1,2,3,5 und 6 (Kreuzkorrelationssignale)

Die maximalen Intensitätswerte der übrigen Ziffern des Zeichenfeldes wurden nicht berücksichtigt, weil sie, einerseits wegen ihres Unterschiedes zu der Form der Vergleichsziffer 4 und andererseits wegen der oben erwähnten schlechteren Übertragungsqualität niedriger als die Intensitätswerte der hier behandelten Auto- und Kreuzkorrelationssignale lagen. Beim Vergleich der Signalintensitäten sind auch hier Einflüsse der unterschiedlichen Qualität der Zeichen untereinander sowie des Trägermaterials (Thermoplasten) zu berücksichtigen.

6.2.3.3. Schlußbemerkung

Am Beispiel einer geringen Anzahl von Ziffern wurde durch erste experimentelle Ergebnisse prinzipiell gezeigt, daß mit Hilfe thermoplastischer Materialien als Direktzeitwandler Korrelationssignalverhältnisse erreicht werden können, die sonst mit den nur für die Laborpraxis geeigneten Photoplaten und Filmen erreichbar sind. Weiterhin wurde eine episkopische Vorrichtung zur Abbildung der in gewöhnlicher Form auf Papier vorliegender Zeicheninformation an das sensibilisierte thermoplastische Wandlermaterial vorgeschlagen. Der praktische Einsatz thermoplastischer Materialien als Direktzeitwandler erfordert jedoch eine weitere Verbesserung der Zahl der Einschreib-Lösch-Zyklen und hängt nicht zuletzt davon ab, ob die erforderliche Flexibilität - vor allem des holographischen Verfahrens - gegen Rotationen, Zeichenverschiebungen, Zeichenfehler usw. mit tragbarem Aufwand wesentlich verbessert werden kann.

Die Verwendung derartiger Materialien in der kohärentoptischen Informationsverarbeitung hätte gegenüber photographischen Materialien den zusätzlichen Vorteil, daß relativ höhere Beugungswirkungsgrade erreicht werden können, weil die Zeicheninformation nicht wie sonst als Amplitudenobjekt, sondern in

Form eines Phasenobjektes mit besseren Lichtmodulationseigenschaften vorliegt. Der hohe Beugungswirkungsgrad, d.h. in diesem Fall das am Objekt gebeugte Licht, hat also zur Folge, daß die holographisch rekonstruierte Signalintensität ebenfalls höher wird.

Der Vergleich der Kurven a und b in Bild 59 zeigt, daß die Übertragung der Zeicheninformation auf das thermoplastische Material so erfolgen kann, daß die Randstruktur der Zeichen geglättet wird.

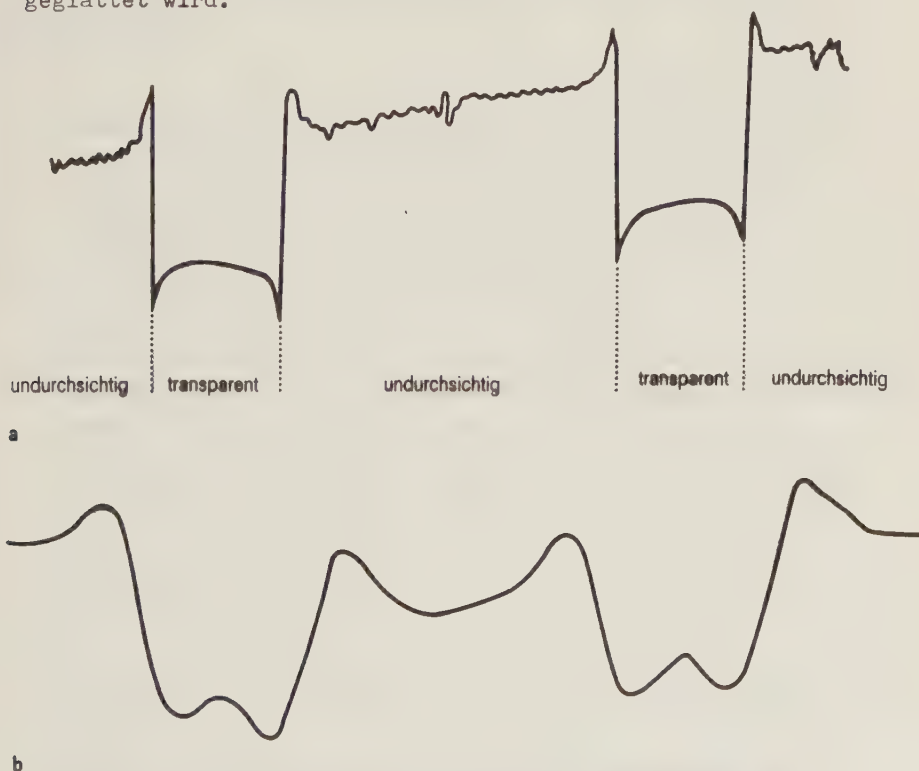


Bild 59. Randstrukturänderung durch die Übertragung von Zeicheninformationen auf das thermoplastische Material b) im Vergleich zu der Randstruktur der gleichen Information auf einer Photoplatte a). (Die Ordinate entspricht der Schichtdicke des Aufnahmematerials)

Diese Eigenschaft kann ein weiterer Vorteil sein, weil der in 6.2.1 nachgewiesene Einfluß der Zeichenrandstruktur auf das Erkennungssignal dadurch kleiner wird. Das Kantenprofil der Zeichen wurde mit einem „Sloan Dektak“ Profilmeßgerät registriert.

Beide Vorteile können außerdem auch bei der Methode der direkten Auswertung der RFS.n zur nichtholographischen Zeichenerkennung ausgenützt werden /65,66/.

7. Zusammenfassung

Kohärentoptische Datenverarbeitungsverfahren zeichnen sich gegenüber den üblichen Verfahren vor allem durch den geringen Aufwand aus, mit dem sie mit bisher unvergleichbar hohen Rechengeschwindigkeiten technisch - wenn auch bis jetzt hauptsächlich im Labor - für einen breiteren Anwendungsbereich realisiert werden können. Besonders interessant ist dabei das holographische Verfahren. Beispiele paralleler Informationsverarbeitung waren bisher nur in biologischen Systemen bekannt.

1. Nach einem kurzen Überblick über die Beziehung derartiger kohärentoptischer Verfahren zu den biologischen Systemen wurden einerseits die Entstehung und die Eigenschaften des Raumfrequenzspektrums, das die zu verarbeitenden Informationen in technisch vorteilhafter Form enthält, und andererseits die theoretischen Grundlagen zur Amplituden- und holographischen Filterung beschrieben. Die anschließenden Abschnitte der Arbeit befassen sich mit der Beschreibung der verwendeten experimentellen Aufbauten und selbstentwickelten Systeme und Systemkomponenten sowie mit der Diskussion bekannter Vielkanalkorrelationsmethoden. Die Hauptaktivitäten konzentrierten sich dabei auf die Erprobung und Entwicklung von solchen holographischen Systemen, die beispielsweise für die Erkennung von alphanumerischen Zeichen und die Klassifizierung von Fingerabdrücken oder zur Unterdrückung der Rotationsabhängigkeit des Filterprozesses nicht nur ein einziges Filter, sondern zur Vielkanalkorrelation jeweils einen Filtersatz benötigen. In diesem Zusammenhang war es außerdem erforderlich, Abschätzungen über den Wirkungsgrad bei paralleler und sequentieller Filteransteuerung, über die Signal-Störlicht-Verhältnisse und die damit zusammenhängende Organisationsform der Detektorelemente sowie über die Lesegeschwindigkeit aufzustellen.

- 1.1. Eine mit vorerst nur fünf Wellenrichtungen holographisch erzeugte Komponente zur vielfachen Beleuchtung und holographischen Erkennung von Ziffern wurde hergestellt und erprobt. Vor allem die Gauß-förmige Intensitätsverteilung über den Querschnitt der zur Erzeugung der Beleuchtungswellen verwendeten Laserstrahlen führte jedoch zur ungleichmäßigen Ansteuerung und teilweisen Übersteuerung der photographischen Schicht und damit auch zu relativ großen Störungen und niedrigen Nutzsignalen.
- 1.2. Zum gleichen Zweck wie in 1.1. wurden einfache Amplituden- und Phasengitter (einzeln oder in kombinierter Form) vorgeschlagen. Eine teilweise Erprobung dieser Gitter führte (4.3.2) bereits zu besseren Signalverhältnissen. Die Verwendung derartiger Gitter in kombinierter Form und bei unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten kann zur Erzeugung und sequentiellen Ansteuerung einer großen Anzahl von Filterhologrammen verwendet werden.
- 1.3. Bei sequentiellen Vielkanalkorrelationssystemen wurde eine Verbesserung des Wirkungsgrades (d.h. der Signalintensität) gegenüber parallelen Systemen ermittelt. Der Faktor dieser Verbesserung, die auf Kosten der Rechengeschwindigkeit erreicht wird, entspricht der Anzahl der parallelen Kanäle.
- 1.4. Die Signal-Störlicht-Verhältnisse und die Organisationsform der Detektorelemente in Abhängigkeit von der Art der Filter-Zuordnung und -Ansteuerung wurde diskutiert. Es konnte festgestellt werden, daß Systeme a) mit nur einem Filter zwar relativ einfach zu realisieren sind, sie jedoch (wegen des einen Filters) nur in vereinzelt Fällen einsetzbar sind, b) mit linearer Filterüberlagerung zur Erhöhung der Anzahl der Korrelationssignalfelder und damit auch zu großen Detektorzahlen führen können, die nicht leicht realisierbar sind, c) mit örtlich getrennten

Filtern (und einer Referenzwellenrichtung und paralleler Filteransteuerung) zur Überlagerung der Auto- und Kreuzkorrelationssignale und damit auch zu unbrauchbaren Signal-Störlicht-Verhältnissen führen und d) mit kombinierter Filter-Zuordnung und -Ansteuerung nach b) und c) eine optimale Ausnutzung der Vorteile beider Methoden gewährleisten können.

- 1.5. Eine aus z.B. Polarisationschaltern (in Matrixform angeordnet) bestehende Anordnung wurde vorgeschlagen, die bei Platzierung vor oder hinter der Filterebene a) eine schnelle und präzise Kanalansteuerung und damit niedrige Signal-Störlicht-Verhältnisse und b) die Realisierung von relativ hohen Leseraten ermöglichen kann.
- 1.6. Außer den oben erwähnten Hologrammen und Gittern wurde eine Keilplatte zur Erkennung und Ansteuerung von bis zu 40 Filterhologrammen erfolgreich eingesetzt. Dazu wurden zwei Keilrotationsvorrichtungen gebaut und erprobt. Wegen der unterschiedlichen Ziele, die damit erreicht werden sollten, unterschieden sich diese Vorrichtungen hauptsächlich durch die Rotationsgeschwindigkeiten (ca. 0,5 U/min bzw. 3000 U/min) und damit auch durch die Filteransteuergeschwindigkeiten. Mit niedrigen Geschwindigkeiten wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, die zur photometrischen Registrierung der Signalintensitäten bei Ansteuerung von 40 bzw. 20 Filterhologrammen mit jeweils sämtlichen Ziffern 0 bis 9 dienten. Bei der Versuchsreihe mit den 40 Filterhologrammen handelte es sich um Filter, die teilweise überlagert waren. Der Vergleich der Intensitätswerte beider Versuchsreihen hat gezeigt, daß auch eine teilweise Filterüberlagerung die Signalverhältnisse ungünstig beeinflusst. Bei der schnelleren Filteransteuerung wurden die Korrelationssignale mit Hilfe einer Glasfaser und eines Sekundärelektronenvervielfachers

auf einem Oszillographen beobachtet und teilweise photographiert. Trotz des geringen Aufwandes wurden bei Verwendung von zeichnerisch hergestellten Zeichen brauchbare Auto-Kreuzkorrelationssignal-Verhältnisse erzielt. Die Leserate dieses Systems wurde mit ca. 150 Ziffern/s errechnet.

- 1.7. Eine Keilplatte mit einem Winkelvielfach zur Erhöhung der Filterkapazität und der Lesegeschwindigkeit wurde vorgeschlagen. Die Filteransteuerung kann damit einzel-, paar- oder multipelweise erfolgen.
- 1.8. Zur weiteren Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Vielkanalkorrelationssystemen mit örtlich getrennter Filterzuordnung wurde eine optische, aus zwei um 180° gegeneinander versetzten Keilen bestehende Anordnung beschrieben, die die rekonstruierten Korrelationsfelder unabhängig von deren Lage durch das Zentrum der Integrationslinse leitet, so daß die Nachteile des Abbildungsfehlers und der relativ kleinen Apertur vermieden werden können.
2. Einen weiteren Schwerpunkt unserer Untersuchungen bildete die Optimierung und die Reproduzierbarkeit der Filterhologramme. Bei diesen Untersuchungen, deren Ergebnisse nach der Beschreibung der angewandten qualitativen und quantitativen Meß- und Prüfmethoden (5.1) ausführlicher in 5.2 erläutert werden, wurden
 - 2.1. die optimalen Aufnahmebedingungen (Belichtungszeit und Objekt-Referenzwellen-Verhältnisse) für Zeichen von zwei verschiedenen Druckqualitäten ermittelt,
 - 2.2. die Auto-Kreuzkorrelationssignal-Verhältnisse in Abhängigkeit von der Druckqualität der Zeichen gemessen und

- 2.3. Intensitätsabweichungen vom Mittelwert der Korrelations-signale, die bei Ansteuerung von unter gleichen Aufnahme- und Ansteuerungsbedingungen hergestellten Filtern ge-messen wurden, bis zu ca. $\pm 20\%$ festgestellt.
3. Im letzten Hauptteil (6.) dieser Arbeit wurden schließ-lich die experimentellen Ergebnisse diskutiert, die durch Amplituden- und holographische Filter sowie bei speziellen Untersuchungen erzielt werden konnten.
- 3.1. Durch einen Spezialfall kohärentoptischer Amplituden-Filterung, die auf dem periodischen Auftreten von Soll-strukturen basiert, wurden in Photomasken Amplituden-, Phasen- und gemischte Fehler erkannt. Mit einem speziellen Filter, das durch die Überlagerung von einem Tief- und einem Hochpaßfilter hergestellt wurde, konnte die für das verwendete optische System theoretisch noch auflösbare Fehlergrenze von ca. $7\text{ }\mu\text{m}$ erreicht werden.
- 3.2. Außer den oben erwähnten Fällen der Vielkanalkorrelation (S.142), wurde das holographische Verfahren (ebenfalls in einfacher Form) zusätzlich zur Durchführung von prinzi-piellen Untersuchungen zur Identifizierung und Klassifi-zierung von Fingerabdrücken verwendet. Aufgrund von experimentellen Ergebnissen konnte gezeigt werden, daß das im Rahmen dieser Aufgabe entwickelte Klassifizierungs-verfahren aussichtsreicher ist als das ebenfalls erprobte Verfahren zur Fingerabdruckidentifizierung. Das Scheitern der holographischen Fingerabdruckidentifizierung ist nach den erhaltenen Ergebnissen vor allem auf die Empfindlich-keit des Verfahrens einerseits auf Fingerabdruckverzerrungen und verschieden großen Fingerabdruckflächen, die zusammen Signalausnahmen bis zu 20% hervorrufen können, und anderer-seits auf die allgemein gültige Rotationsabhängigkeit zu-rückzuführen. Am Beispiel eines Fingerabdruckes wurde bei einer Abweichung der Rotationslage von nur 1° bereits eine

Signalabnahme von ca. 50 % festgestellt. Einflüsse der für die Fingerabdrücke beim praktischen Einsatz des Verfahrens in Frage kommenden transparenten Trägermaterials können dagegen durch die Verwendung von hochwertigeren Filmen vernachlässigbar klein gehalten werden. Die Chancen des holographischen Klassifizierungsverfahrens, für welches nicht ein einziges Filter, sondern ein Filtersatz benötigt wird, sind darin zu begründen, daß es wegen der Auswertung der Merkmale, die nur eine geringere Fingerabdruckfläche belegen, die bisher erwähnten ungünstig wirkenden Einflüsse auf ein Mindestmaß reduziert werden können. Bei einem Grundexperiment wurde dieses Verfahren am Beispiel von zwei anatomischen Merkmalen (Ring und Delta) eines simulierten Fingerabdruckes erfolgreich erprobt.

- 3.3. Bei den ersten zwei Fällen der speziellen Untersuchungen, deren Ergebnisse in 6.2 beschrieben werden, ging es vor allem um die Feststellung der Empfindlichkeit des holographischen Verfahrens a) auf grobe Fehler, mit denen die zur maschinellen Verarbeitung vorliegenden Zeichen behaftet sein können, b) auf die Qualitätsunterschiede der Randstruktur der Zeichen und c) auf die endliche Dicke der photographischen Schicht der Filterplatte.

Aufgrund von eingehenden Messungen bzw. Betrachtungen der Korrelationssignale und der Lichtverteilungen in der Raumfrequenzebene wurden bei Korrelationen mit Ziffern, die mit reellen und simulierten Fehlern behaftet waren, Signalabnahmen bis zu 90 % und bei Ziffern, die aus einer Schreibmaschine stammten, Signalunterschiede bis zu 40 % gemessen. Letztere Schwankungen sind vorwiegend auf die unterschiedliche Qualität der Randstruktur der Ziffern zurückzuführen.

Sehr stark sind, wie ebenfalls durch Meßergebnisse belegt werden konnte, auch die Signalschwankungen und flächen-

haften Signalverformungen, die bei Zeichenversetzungen in der Eingabeebene infolge der endlichen Dicke der photographischen Schicht der Filterplatten auftreten können. So reichen z.B. Objektversetzungen von nur 8 mm aus, um eine Verringerung der Signalintensität um den Faktor 5 zu bewirken.

- 3.4. Experimentelle Ergebnisse, die bei Verwendung von thermoplastischen Materialien als Zeichenträger erzielt wurden, sind vergleichbar mit Ergebnissen, die sonst beim Einsatz von anderen Trägern (Film und Photoplatte) erhalten werden konnten. Der Vorteil der thermoplastischen Materialien für die holographische Zeichenerkennung liegt vor allem darin, daß sie löschar sind. Mit der Beschreibung einer optischen Anordnung wurde weiterhin gezeigt, daß derartige Materialien zur Direktzeitwandlung der meistens auf Papier und damit für die kohärentoptischen Zeichenerkennungsverfahren in ungeeigneter Form vorliegenden Zeicheninformation verwendet werden können, wenn die Einschreib-Lösch-Zyklenzahl, die in der letzten Zeit wesentlich erhöht wurde, weiter gesteigert wird.
4. Abschließend sei aufgrund der bei dieser Arbeit gewonnenen Erfahrungen noch erwähnt, daß vor allem
- a) die Rotationsabhängigkeit der kohärentoptischen Informationsverarbeitungsverfahren,
 - b) die relativ starken Einflüsse von verschiedenartigen Abweichungen der Zeichen von der Sollage (in der Objektebene) und Sollgröße,
 - c) das Fehlen einer flexiblen Methode zur direkten Umwandlung der Zeicheninformation in geeignete Form und
 - d) nicht zuletzt die immer stärker spürbar werdende Vervollkommnung und Verbilligung handelsüblicher Konkurrenzsysteme,
- zumindest bisher die technische Ausnutzung der hervorragenden und für den Forscher nach wie vor reizvollen Eigenschaften dieses Verfahrens - trotz der optimistischen Prognosen mancher Autoren - verhindert haben.

A n h a n g A

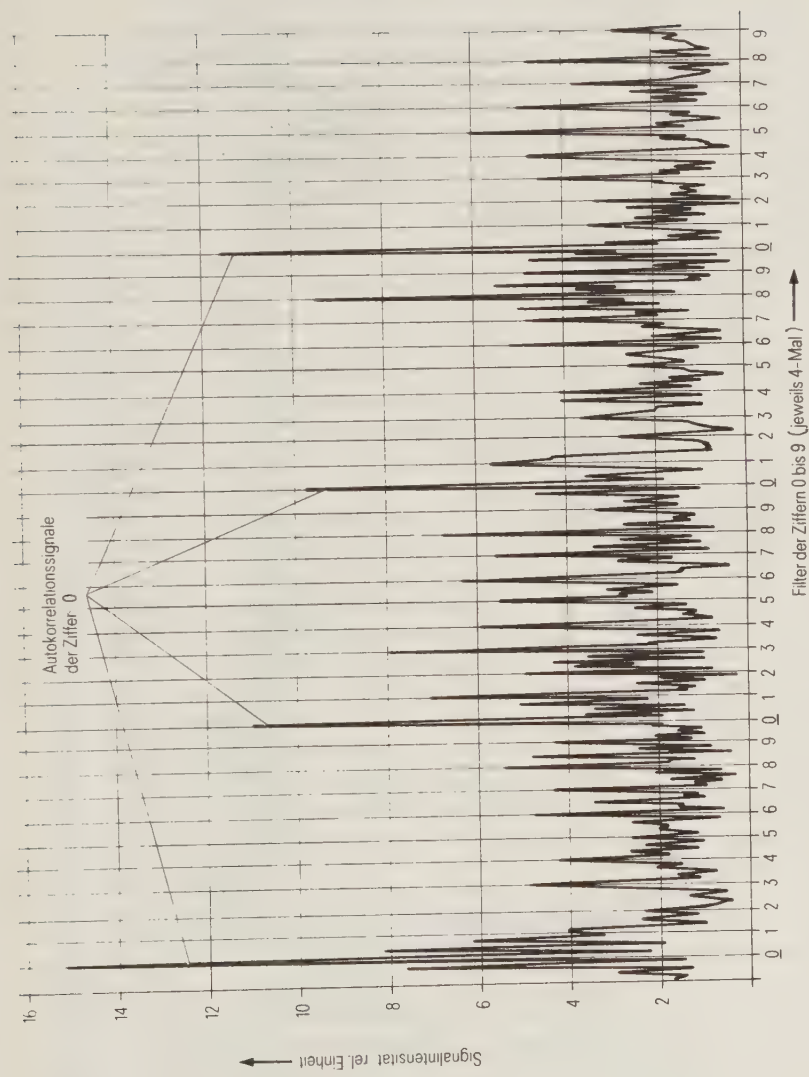


Bild 40d. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RPS der Ziffer 0

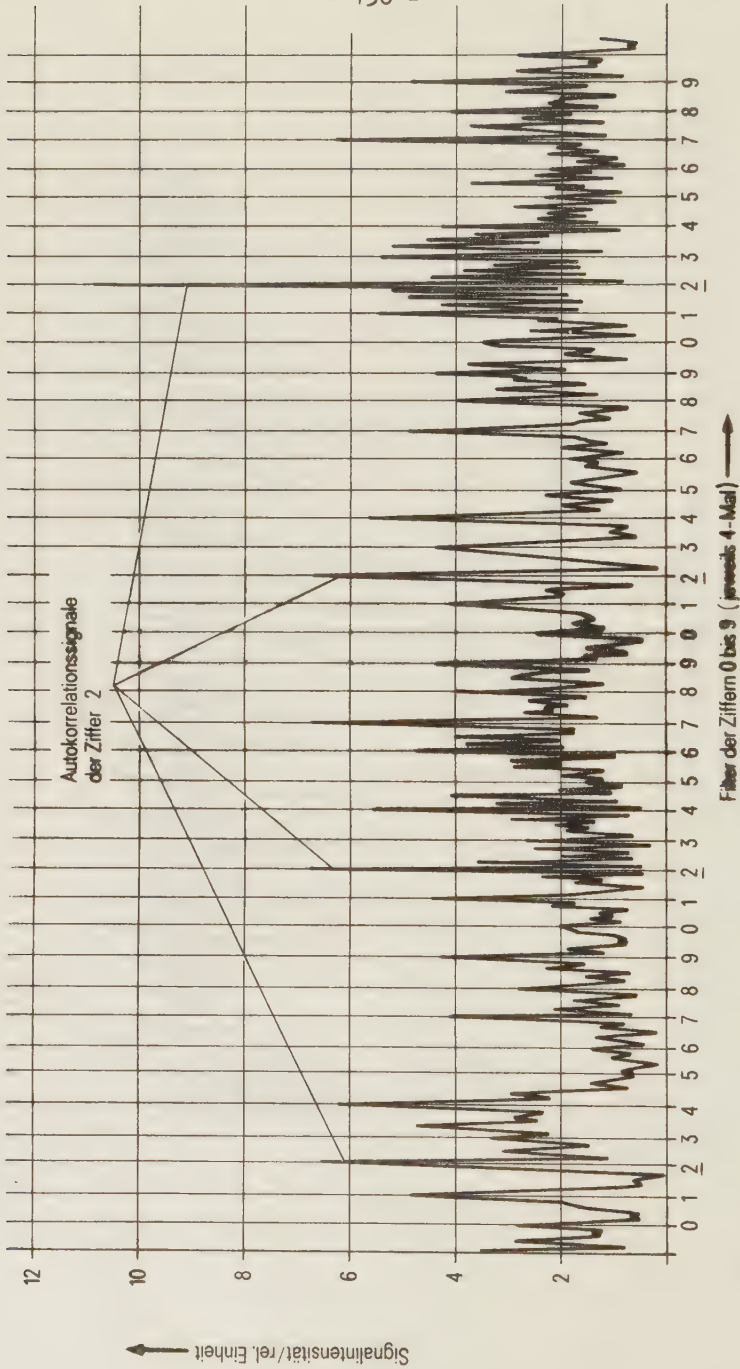


Bild 40e. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 2

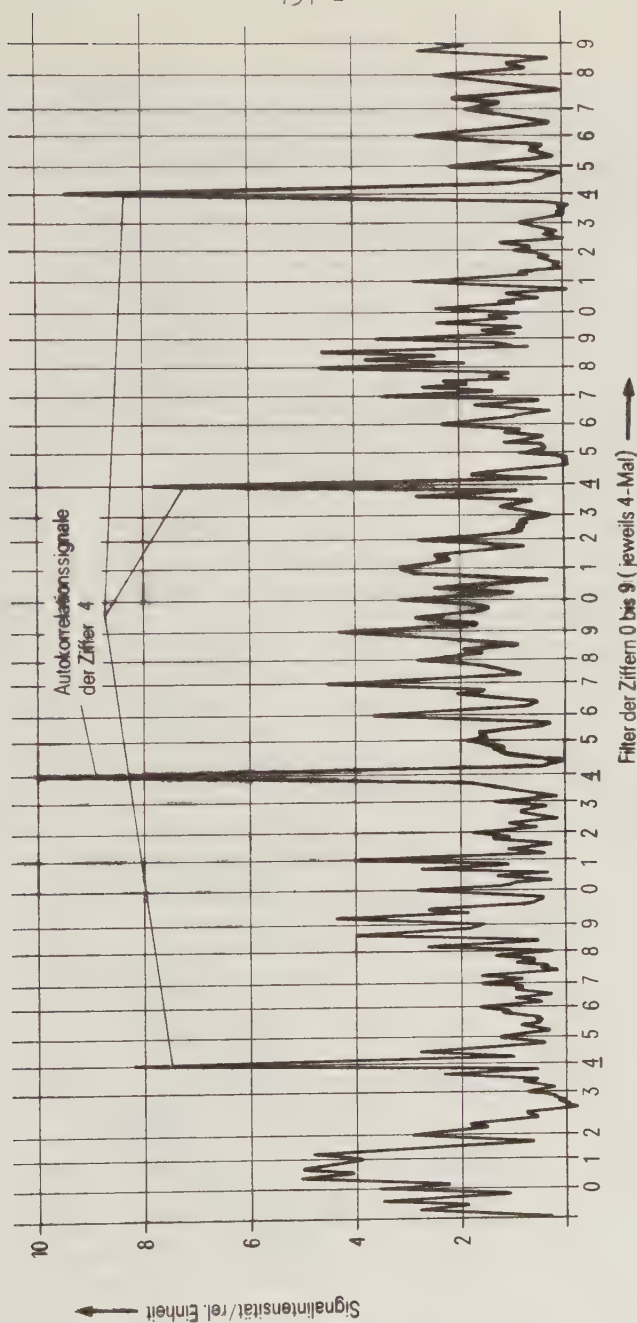


Bild 40f. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 4

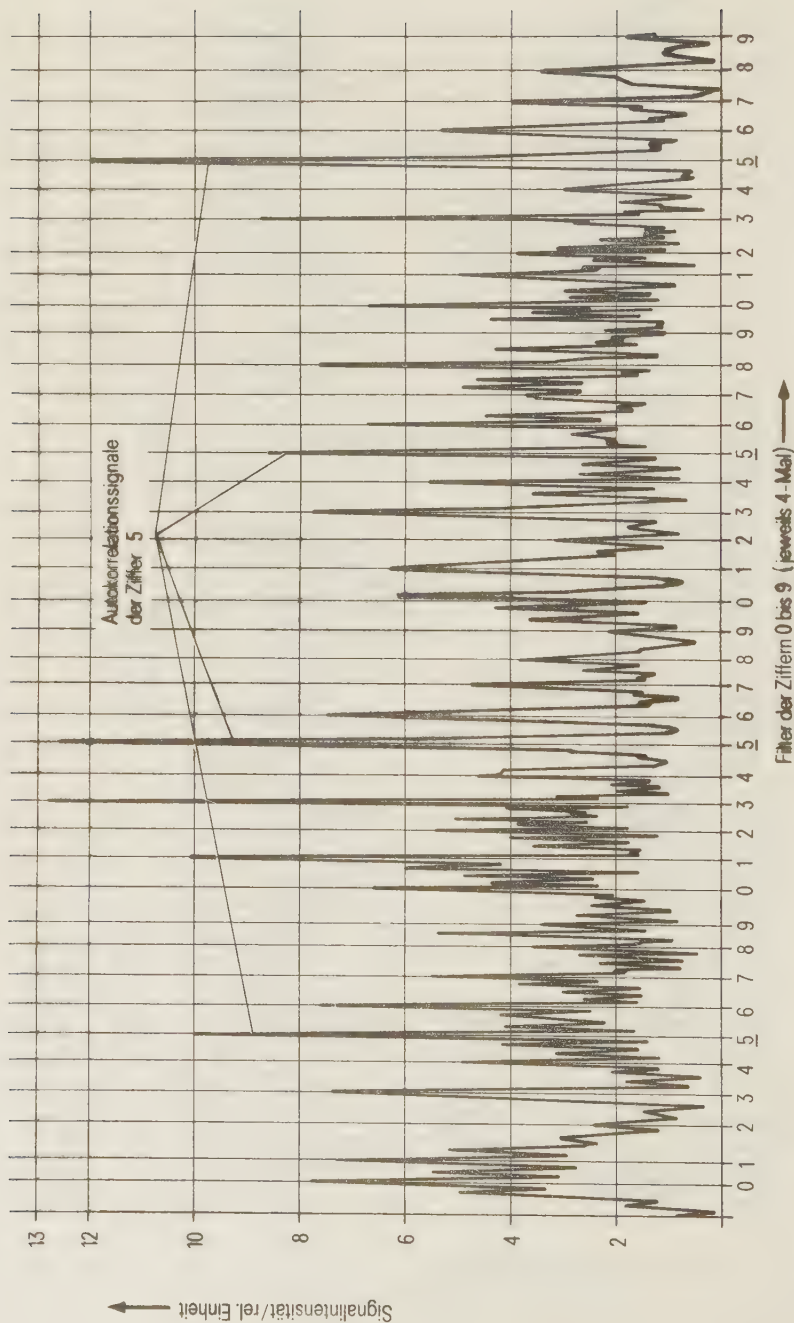


Bild 4. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RPS der Ziffer 5

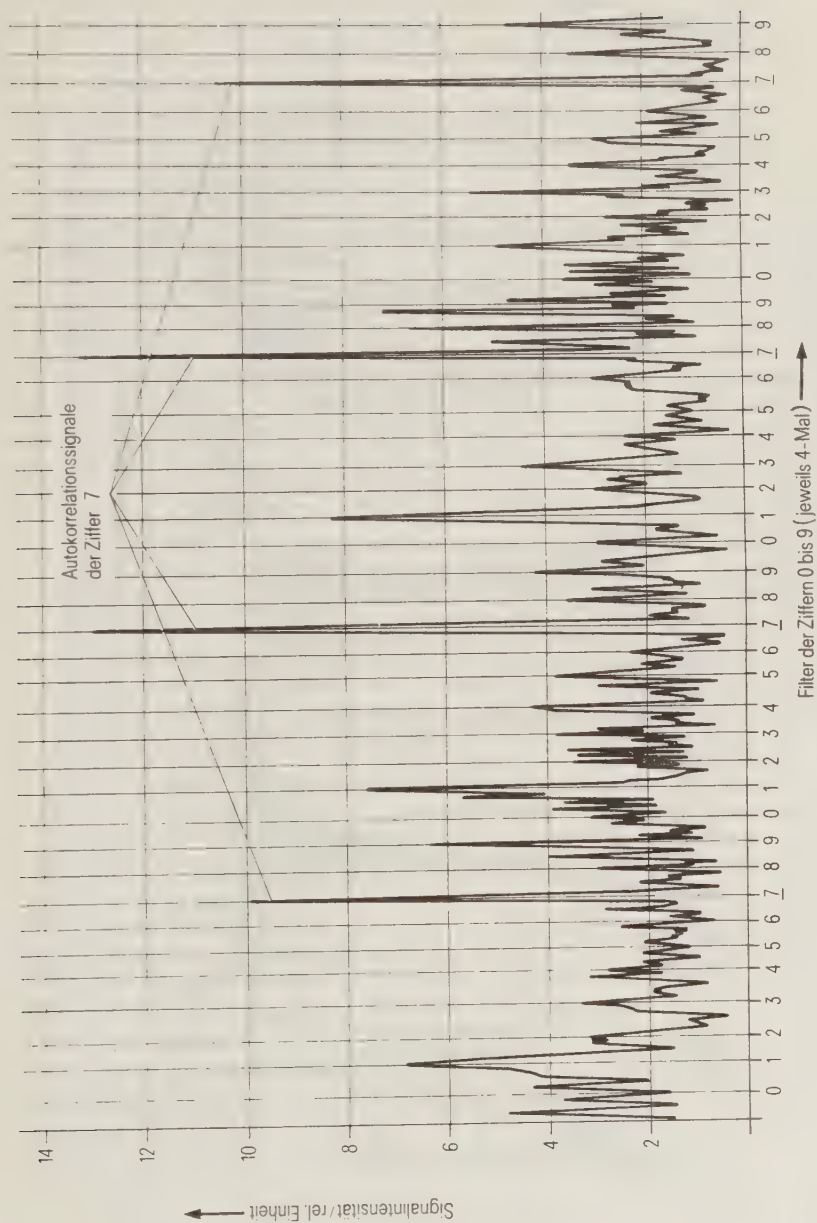


Bild 40h. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 7

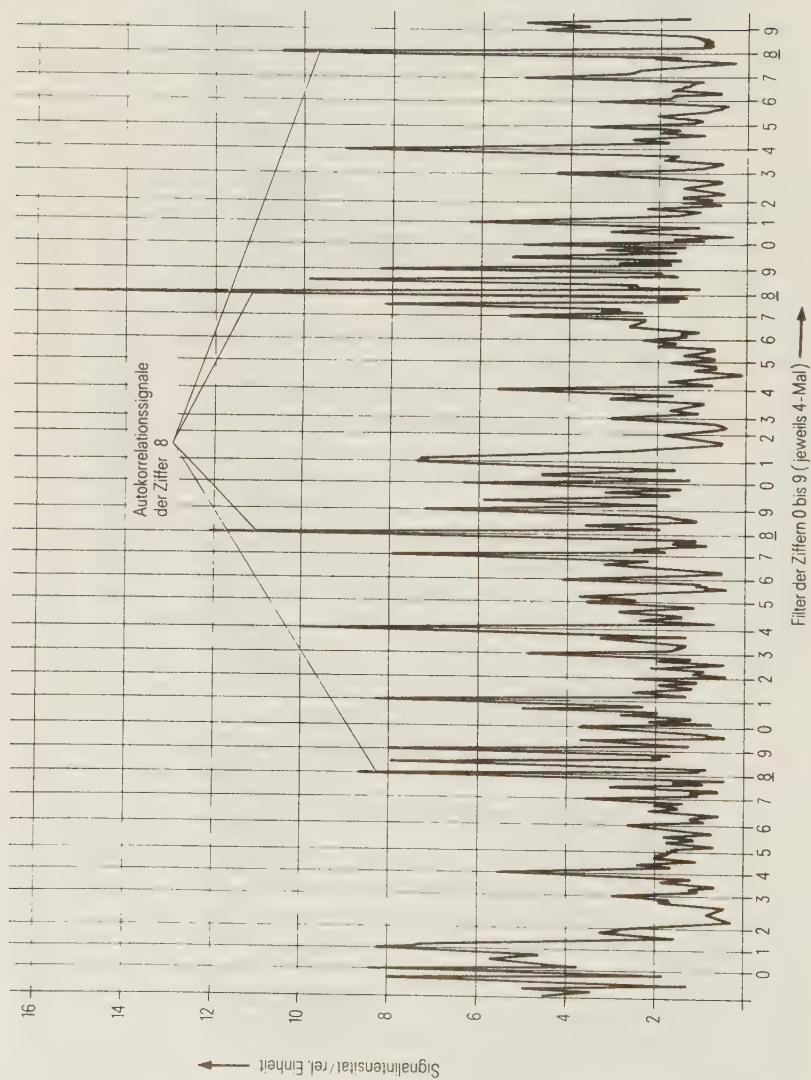


Bild 401. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 8

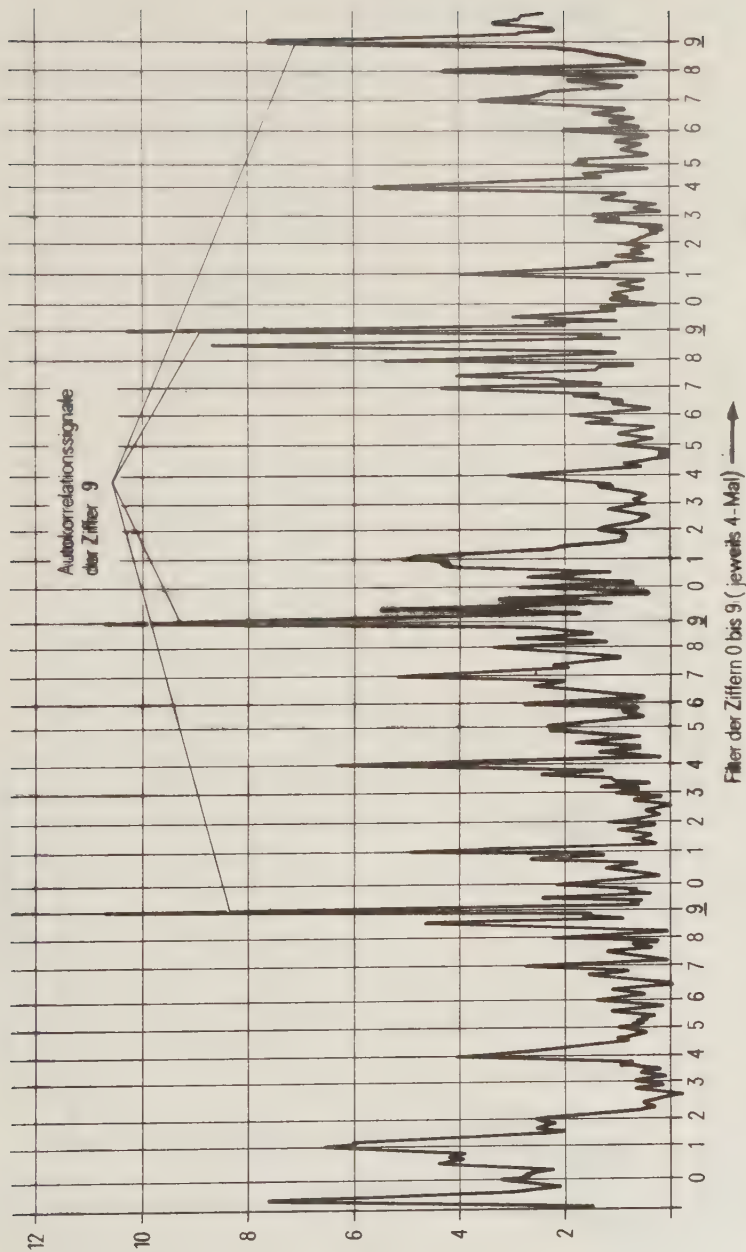


Bild 40j. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 40 Filterhologramme mit den RFS der Ziffer 9

A n h a n g B

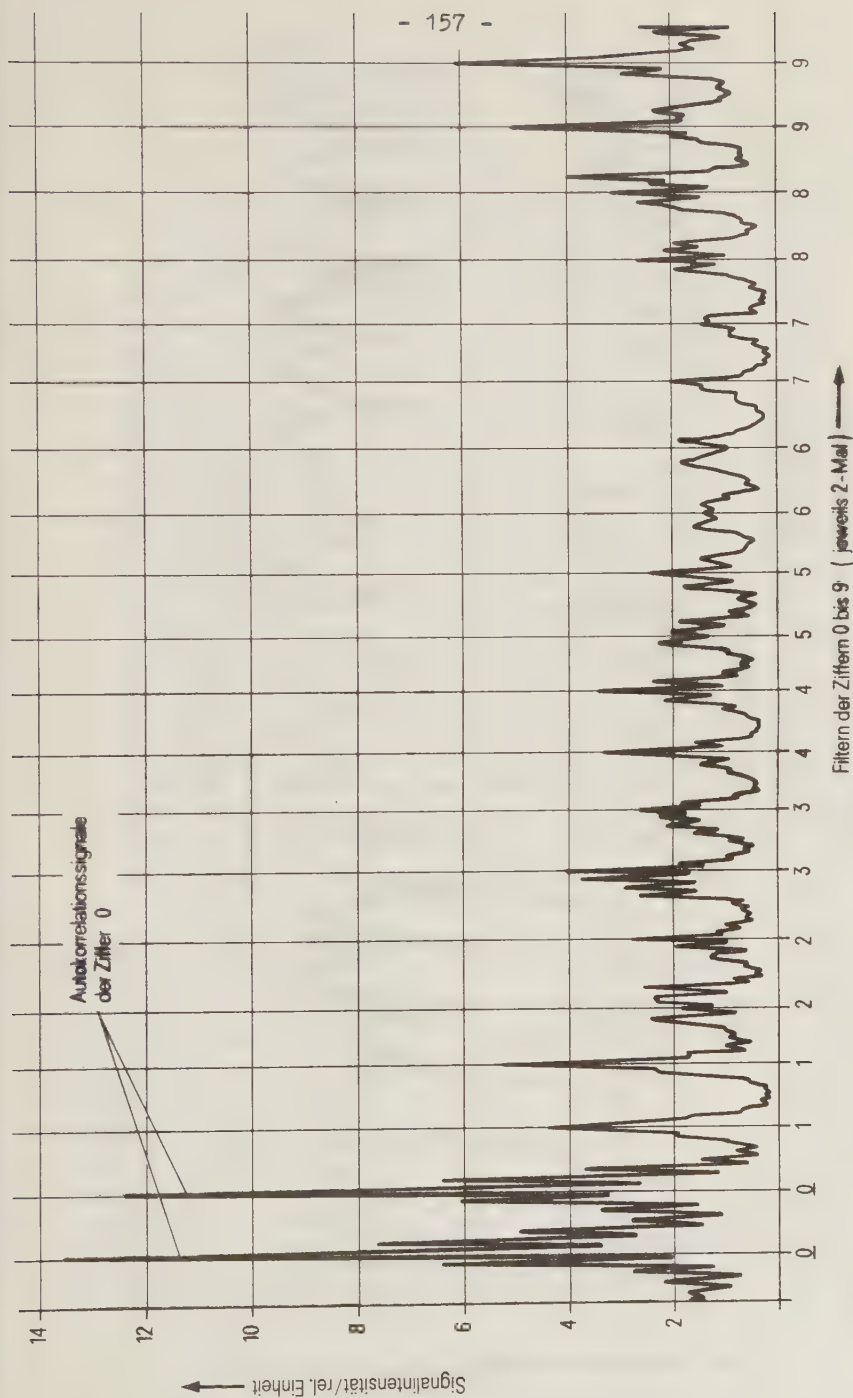


Bild 41d. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RES der Ziffer 0

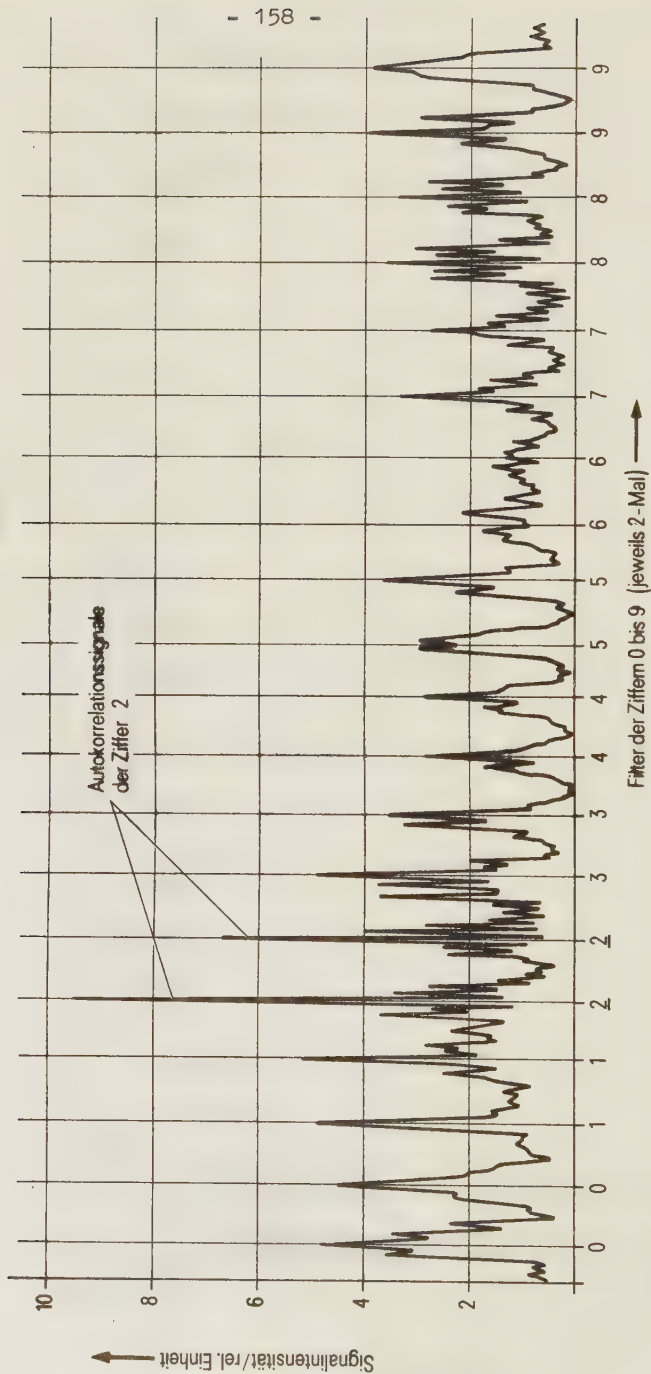


Bild 41e. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RES der Ziffer 2

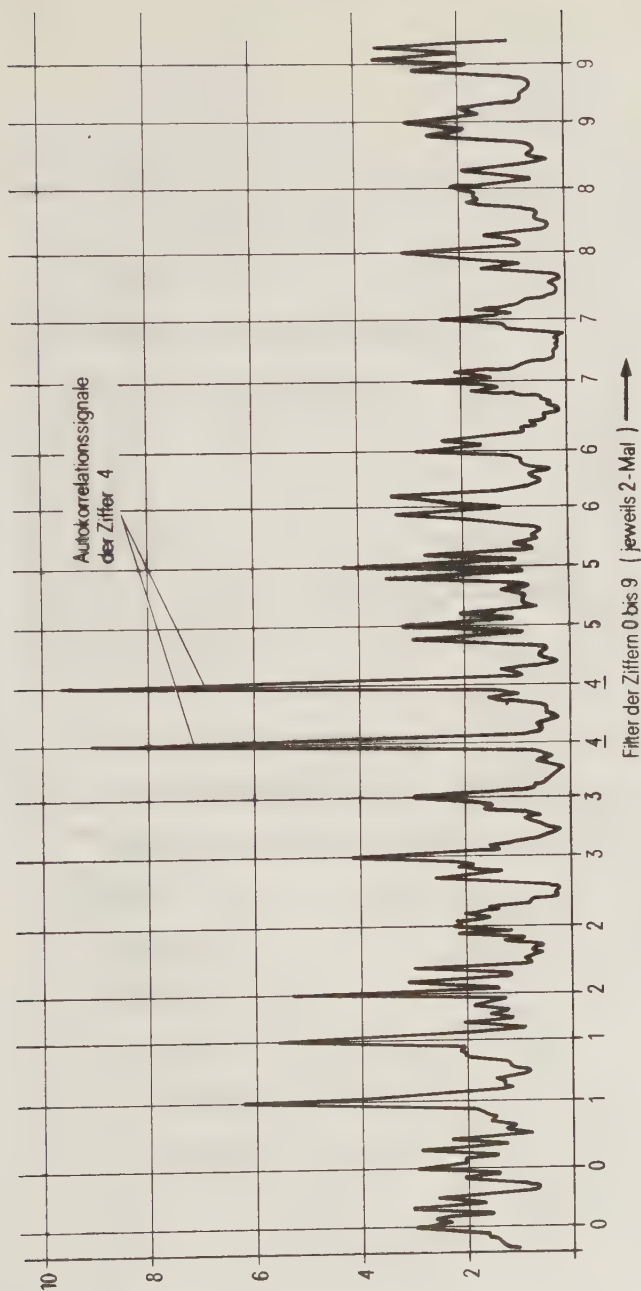


Bild 41f. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 4

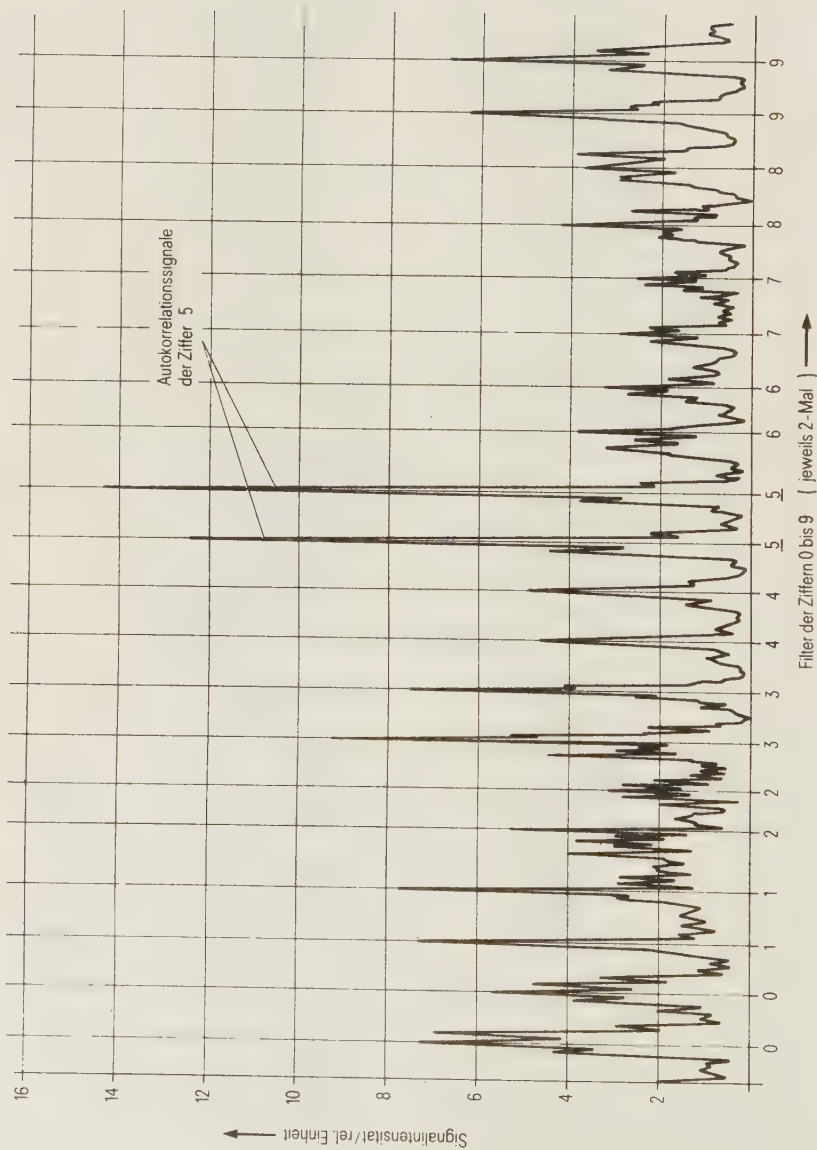


Bild 41g. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 5

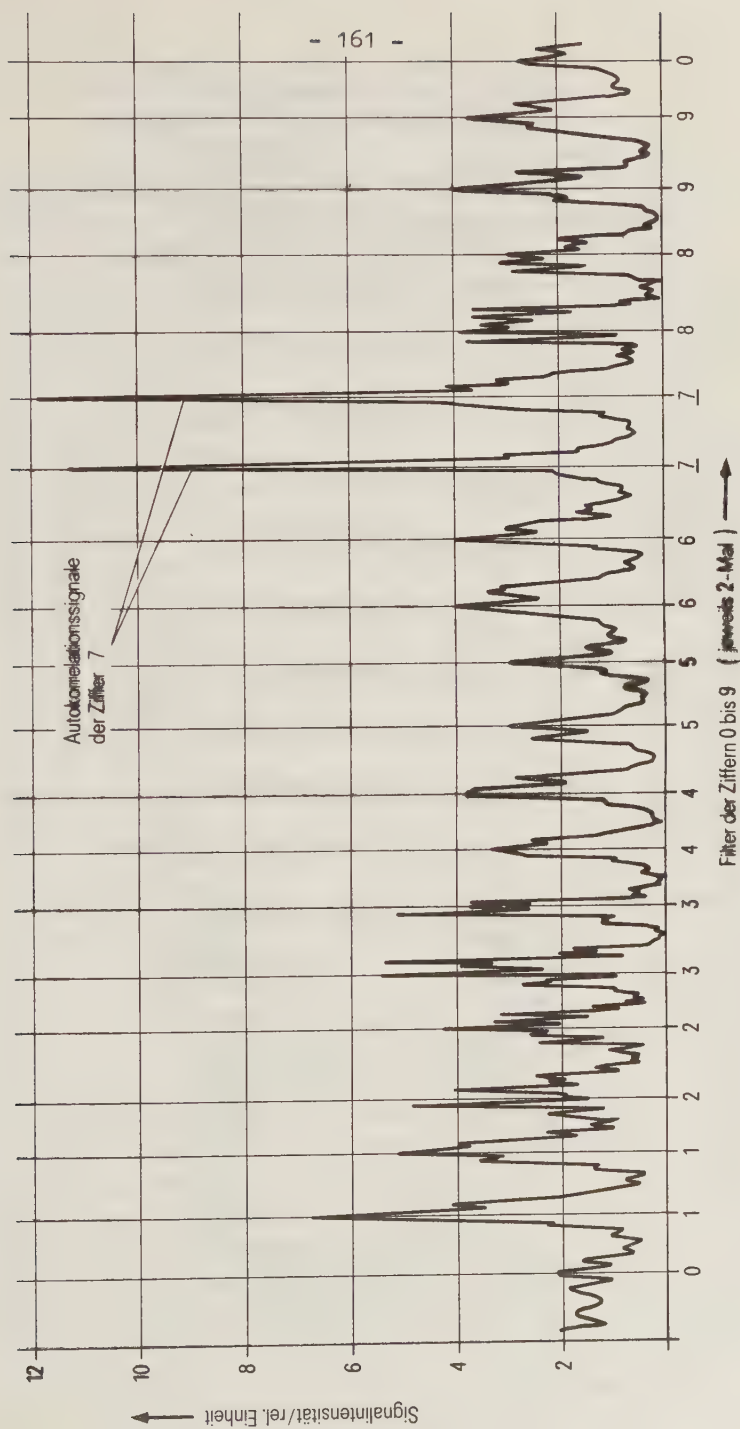


Bild 41h. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 7

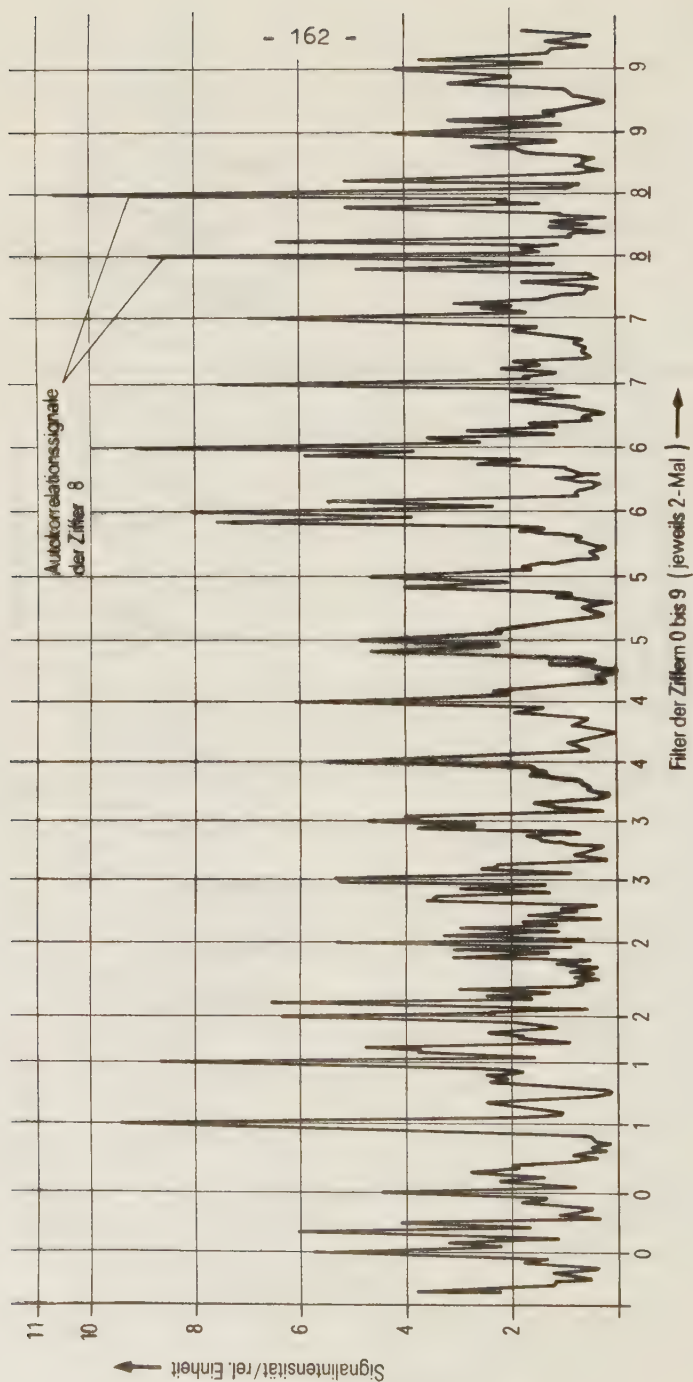


Bild 41i. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 8

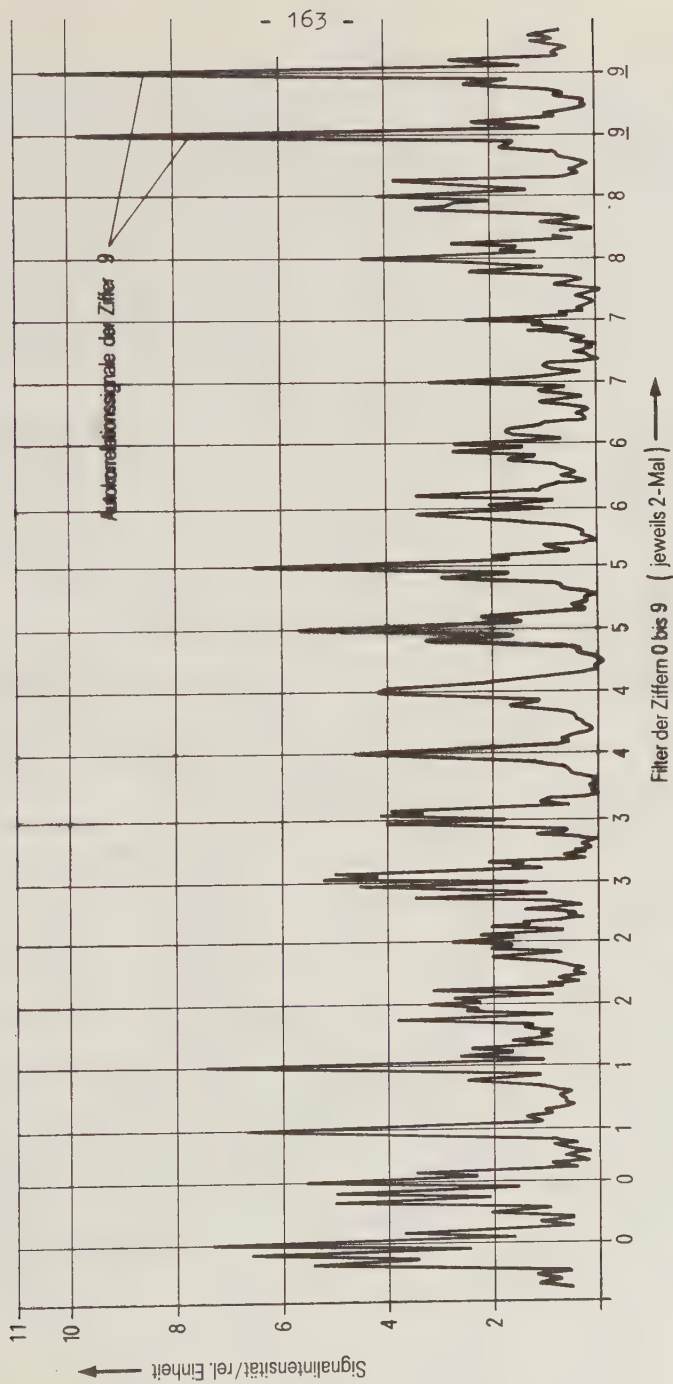


Bild 413. Signalintensitäten bei Ansteuerung der 20 Filterhologramme mit dem RFS der Ziffer 9

8. SCHRIFTTUM

- /1/ Steinbuch,K. u. H.Kazmierczak: Grundlagen und Anwendungen der Automatischen Zeichenerkennung, Jahrb.d.el. Fernmeldewesens 60/61 (Hrsg.K.Herz),Bad Windsheim 1962
- /2/ Steinbuch,K.: Information, Computer und Künstliche Intelligenz, Frankfurt/M., Umschau-Verlag 1967
- /3/ Thomas,F., L.P.Horwitz: IBM Bibliography,Res.Rep. RC-1088 28 Febr.1964
- /4/ Kazmierczak,H.: Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung 2.Auflage (1967), Springer-Verlag, S. 754-787
- /5/ Steinbuch,K.: Automat und Mensch, 4.Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1971
- /6/ Hassenstein,B.: Biologische Kybernetik,Heidelberg Quelle & Meyer 1965
- /7/ Turing,A.M.: Proc.London Math.Soc. (2) 42, 220 (1936-37)
- /8/ Steinbuch,K.: Naturwiss., 58.Jg. Heft 4, 1971, S.210-217
- /9/ Datenblatt der Fa. CONTROL DATA über das Multifont-Seitenlesesystem (SSOCR)
- /10/ Müller,G., P.Schröer: Bürotechnik u. Automation, 12(1971) 7, S. 435-440
- /11/ Müller,D.: Fernmeldetechnik, 11 (1971) Heft 7, S. 225-228
- /12/ Maiman,T.H.: Nature 187 (1960), 493-494
- /13/ Gabor,D.: Nature (London) 161 (1948), 777-778
- /14/ Goodmann,J.W.: Introduction to Fourier optics, McGraw-Hill, N.Y. (1968)
- /15/ Preston,K.: Coherent optical computers, McGraw-Hill,N.Y.(1972)
- /16/ Francom,M.: Holographie, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1972
- /17/ Papoulis,A.: Systems and transforms with applications in optics, McGraw-Hill, N.Y. (1968)
- /18/ Vander-Lugt,A.: a) IEEE Trans. IT-10 (1964), 139-145
b) Optica Acta 15/1 (1968), 1-33
- /19/ Fournier,J.M.: Symp.Eng.Appl.of Lasers, Tel Aviv (1970)
- /20/ Horvath,V.V., J.M.Holeman u.C.Q.Lemmond: Laser Focus 3 (1967), 18-23
- /21/ Barlai,P.: NTZ Heft 10 (1972), 474-475
- /22/ Douklias,N., H.Kiemle u.G.Winzer: DGaO-Tagung, Bad Hersfeld (1972)
- /23/ Douklias,N., G.Winzer: Arch.f.Kriminal. 151/1 u. 1 (1973) 31-40
- /24/ Lendaris,G.G. u.G.L.Stanley: Proc.IEEE 58/2 (1970),198-216
- /25/ Jackson,P.L.: Appl.Opt. 4/4 (1965), 419-427
- /26/ Greis,U., R.Röhler: Optica Acta (1970), Vol.17,No.7,515-526
- /27/ Leverington,D.: Optics Technol. 1 (1969), 153-156
- /28/ Hutzler,P., F.Lanzl u.W.Waidelich: DGaO-Tagung,Aalen (1973)A 14
- /29/ Feleppa,E.J.: IEEE Trans.BME-19/3 (1972), 194-205
- /30/ Falconer,D.G.: Appl.Opt. 5/9 (1966), 1365-1369
- /31/ Atzeni,C. u.L.Pantani: Alta Freq. (Corresp.) 37 (1968),687
- /32/ Arm,M., L.Lambert u.I.Weissmann: Proc. IEEE (Corresp.) 52 (1964), 842
- /33/ Wattkins,L.S.: Proc.IEEE 57 (1969), 1634-1639
- /34/ Winzer,G., N.Douklias u.H.P.Kraft: Frequenz 25/8 (1971) 220-226

- /35/ Douklias, N., H.P.Kraft u.G.Winzer: DGaO-Tagung, Bad Hersfeld 1972
- /36/ Axelrod, N.M.: IEEE Proc.Lett. 60 (1972), 447-448
- /37/ Lohmann, A.W.: Universität Erlangen-Nürnberg, Phys.Inst. für angewandte Optik, Private Mitteil.(Jan.1974)
- /38/ Kulke, W.: Verfahren zur optischen Zeichenerkennung Deutsche Patentschrift 1809 903
- /39/ BIONIK, Studie über ein Förderungsprogramm, ausgearb. im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung u.Wissenschaft Dezember 1969
- /40/ Michael, C.R.: Scientific American 220/5 (1969), S. 105-115
- /41/ Marko, H., H.Giebel: NTZ 1970, Heft 9, S.455-459
- /42/ Marko, H.: EIK 5 (1969), 2, 73-90
- /43/ Schade, J.P., D.H.Ford: „Basic Neurology“ (1965)
- /44/ Lettvin, J.Y., H.R.Maturana, W.X.McCullach, W.H.Pitts Proc.of the IRE 47 (1959), S.1940-1951
- /45/ Marko, H.: Kybernetik V (1969), S.221-240
- /46/ Freiser, M.S., P.M.Marcus: IEEE Trans.Magn.Mag-5, No.2 (1969), 82-90
- /47/ Grüter, O.: Daten-Speicher aus dem Bereich der Biologie, Manuskript aus einem Vortrag bei der Fa.Siemens AG, 1971
- /48/ Graupe, D., J.W.Lynn: Cybernetica 12 (1969), 3
- /49/ Westlake, P.R.: Kybernetik Bd. VII, 4 (1970)
- /50/ Arkadiew, A.G., E.M.Brawemann: Zeichenerkennung und maschinelles Lernen, Oldenburg-Verlag, München und Wien 1966
- /51/ Michael, C.R.: Scientific American, 220/5 (1969), 105-115
- /52/ Hasenstein, B.: Kybernetik und biologische Forschung Akademische Verlagsgesellschaft Athenaion Frankfurt 1966
- /53/ Platzter, H.: The simulation of a system of homogeneous layers with coherent light Zeichenerkennung durch biologische und technische Systeme, Springer-Verlag Berlin 1971 170-175
- /54/ Abbe, E.: Gesammelte Abhandlungen Bd. 1, Verlag Gustav Fischer, Jena 1905
- /55/ Born, M., E.Wolf: Principles of Optics, Pergamon Press Oxford-London-Edinburgh, Third Edition, 1965
- /56/ Röhler, R.: Informationstheorie in der Optik Optik und Feinmechanik in Einzeldarstellungen Band 6, Wissenschaftl.Verlagsges.Stuttgart 1967
- /57/ Platzter, H. u. Etschberger: Laser + Elektro-Optik 1/2 (1972), 39-45
- /58/ Bergmann, L., Cl.Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik Bd.III, Berlin 1966
- /59/ Koepf, G.: Dissertation TH Wien (Mai 1972)
- /60/ Zernike, F.: Phys.Zeitschrift 36 (1935), S.848-851
- /61/ Maréchal, A. u.P.Croce: Compt.Rend 237 (1953), 607
- /62/ Vander-Lugt, A.: IEEE Trans. IT-10 (1964), 139-145
- /63/ Tiziani, H.: DGaO-Tagung 1970, St.Gallen
- /64/ Tiziani, H.J. u.W.Witz: Optik 32 (1971), 484-495
- /65/ Timme, M., D.Haina, F.Lanzl u.W.Waidelich: DGaO-Tagung 1971, Celle
- /66/ Holzinger, G., W.Jaerisch, K.Kosanke u.A.Schmackpfeffer: Opt.Commun. 5/1 (1972), 39-40

- /67/ Durin, G.L.: IRB Trans. IT-6 (1960), 111-120
- /68/ Winzer, G., N.Douklias: Israel Journ. of Technology 9/3 (1971), 275-279
- /69/ Kiemle, H. u.D.Röß: Einführung in die Technik der Holographie, Akad.Verlagsges.Frankfurt/M. 1969
- /70/ Pennington, K.S., J.S.Harper: Appl.Opt. 9/7 (1970), 1643
- /71/ Lin, L.H. u.L.W.Lo Blanco: Appl.Opt. 6/7 (1967), 1255-1258
- /72/ Burckhardt, C.B.: Appl.Opt. 6/8 (1967), 1359-1366
- /73/ Gabor, D.: Nature 208 (1968), 422-423
- /74/ Vander-Lugt, A.: Appl.Opt. 5/11 (1966), 1760-1765
- /75/ Groh, G.: Opt.Comm. 1/9 (1970), 454-456
- /76/ Groh, G.: Appl.Opt. 7 (1968), 1643
- /77/ Kock, M. u.G.Rabe: Opt.Comm. 5/2 (1972), 73-77
- /78/ Leith, E.N., A.Kozma, S.Upatnieks, J.Marks, N.Massey: Appl.Opt. 5 (1966), 1303
- /79/ Van Ligten, R.F., K.C.Lawton: J.Appl.Phys. 38 (1967), 1994-1996
- /80a/ La Macchia, S.T., D.L.White: Appl.Opt. 7 (1968), 91
- /80b/ Aitken, G.S.M., L.Wang: Appl.Opt. 10/11 (1971), 2476-2481
- /81/ Winzer, G., N.Douklias: Optics & Laser Technol. (Oct. 1972)
- /82/ Winzer, G., N.Douklias: AGARD Avionics Panel Symp. Rom (May 1970); AGARD Conf.Proc. 94/21 (1971)
- /83/ Winzer, G., N.Douklias: Zusammenfassender Zwischenbericht zum Förderungsprogramm "Zeichenerkennung und Ortung" BMW III A2-7291-NT29 (Dez. 1970)
- /84/ Kogelnik, H.: Proc. of the Symp. on Modern Optics, Vol.XVII (1967), 605-617
- /85/ Dammann, H., K.Görtler: Opt.Comm. 3 (1971), 312
- /86/ Armitage, J.D., A.W.Lohmann: Appl.Opt. 4/4 (1965), 399-403
- /87/ Müller, P.F.: Appl.Opt. 8 (1969), 267
- /88/ Bestenreiner, R., R.Deml: Optik 28/3 (1968), 263-287
- /89/ Winzer, G., I.Kachel: Optica Acta 20/5 (1973), 359-364
- /90/ Hutzler, P.: Laser + Elektrooptik 4/3 (1972), 59-61
- /91/ Röß, D.: Laser, Lichtverstärker und Oszillatoren
Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt/M.
1966, 375
- /92/ Winzer, G.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen kohärentoptischer Masken- und Raumfrequenzfilterverfahren, Dissertationsschrift, Techn. Universität Berlin (in Vorbereitung)
- /93/ Nakajima, M., T.Morikawa u.K.Sakurai: Appl.Opt. 11/2 (1972) 362-371
- /94/ Winzer, G., N.Douklias: Zwischenbericht zum Förderungsprogramm "Physikalische Technologie" - Zeichenerkennung und Ortung - BMW - III A2-7291-NT29 (Juni 1972)
- /95/ Binns, R.A., A.Dickinson u.B.M.Watrasiewicz: Appl.Opt. 7/6 (1968), 1047-1051
- /96/ Ullrich, H.: Festkörperprobleme IX (1969), 373-391
- /97/ Beadles, B.L., W.M.Breen: Opt.Soc.Amer. (Jan.1971), MB4-1
- /98/ Vienot, J.Ch.: Pattern Recognition by Spatial Filtering
Abdrücke der Holographie, Arbeitsgemeinschaft
Battelle-Institut, Frankfurt/M. 30.11./1.12.67
- /99/ Groh, G., G.Marie: Opt.Comm. 2/3 (1970), 133-135
- /100/ Watrasiewicz, B.M. Optics u. Laser Technol. 4 (1972), 301

- /101/ Fischer,K.: „Vorsicht Fingerabdrücke“, BLK-Blatt Nr.35/67, 4.Folge, August 1967
- /102/ Steinwender, E.: Daktyloskopie, Schriftenreihe des Bundeskriminalamtes Wiesbaden (1955/1), 51-55
- /103/ Sties,M.: 2.Entwurf für die Revision von ISO R 1831, Abschnitt 4 und für die Neufassung von DIN 66008, Bl. 2, Abschnitt 4 und der Erläuterungen, FIM, Karlsruhe, 1973
- /104/ Douklias,N., J.Shamir: Appl.Opt. 12/2 (1973), 364-367
- /105/ Kogelnik,H.: Bell Syst.Techn.J. 48 (1969), 2909
- /106/ Latta,J.N.: Appl.Opt. 10/3 (1971), 599
- /107/ Lanz,F., O.Wess: DGaO-Tagung 1971, Celle
- /108/ Lohmann,A.W., H.W.Werlich: Appl.Opt.10/3 (1971),670-672
- /109/ Baues,P., F.Mayerhofer, G.Winzer: Abschlußbericht über „Kohärent-optische Impulskompression und kohärent-optischer Direktzeitwandler (Thema II z. Forschungsantrag Nr. T II 2/T/0230/ 92519/91321), Bundesministerium für Verteidigung Jan. 1974
- /110/ Urbach,J.C., R.W.Meier: J.Opt.Soc.Am. 56 (1966), 537
- /111/ Lin,L.H.,H.L.Beauchamp: Appl.Opt. 9/9 (1970), 2088
- /112/ Ost,J.: DGaO-Tagung 1972, Bad Hersfeld
- /113/ Colburn,W.S., S.B.Dubow: Photoplastic Recording Materials, Air Force Avionics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Aug. 1973
- /114/ Ost,J.: Siemens AG, München, Private Mitteilung
- /115/ Preston,K.: Proc. IEEE 60/10 (1972), 1216-1231
- /116/ Winzer,G.: Appl.Phys. 1-4 (1974)

Verzeichnis der zur vorliegenden Arbeit gehörenden Veröffentlichungen, Vorträge und Patentanmeldungen

Veröffentlichungen

1. Winzer,G., N.Douklias:
Some Technological Aspects of a Holographic Matched Filter Correlator; Israel Journ.of Techn.,Vol.9,No. 3,(1971), 275-279
2. Winzer,G., N.Douklias:
Holographic Pattern Recognition Using a Multichannel Correlator; XXI Agerd Avionics Panel Technical Symposium, Rome, May 1971
3. Winzer,G., N.Douklias:
Improved Holographic Matched Filter Systems for Pattern Recognition Using a Correlation Method; Optics and Laser Technology (October 1972),222-227
4. Winzer,G., N.Douklias, H.-P.Kraft:
Probleme der Fehlererkennung in Masken für integrierte Halbleiterschaltungen bei kohärent-optischer Filterung Frequenz, Band 25 (1971), Heft 8
5. Winzer,G., N.Douklias, H.-P.Kraft:
Comments on Filtering of Defects in Integrated Circuits Appl.Opt., 11/5 (May 1972), 1269

6. Douklias, N., G. Winzer:
Holographischer Versuch der Klassifizierung von Fingerabdrücken für elektronische Datenverarbeitung; Archiv f. Kriminologie, Bd. 151, Heft 1 u. 2 (1973)
7. Douklias, N., J. Shamir:
Relation between Object Position and Autocorrelation Spots in the Vander Lugt Filtering Process. 2: Influence of the Volume Nature of the Photographic Emulsion; Appl. Opt., 12/2 (February 1973), 364-367
8. Douklias, N.:
Error Sensitivity of Holographic Character Reading Systems; erscheint demnächst in Optics and Laser Technology

Vorträge

1. Winzer, G., N. Douklias:
Holographic Pattern Recognition Using a Multichannel Correlator; AGARD Avionics Panel Symp., Rom (Mai 1970)
2. Douklias, N., G. Winzer:
Holographische Vielkanalkorrelation bei paralleler und sequentieller Signalverarbeitung; DGAO-Tagung, Celle 1971 /44
3. Kraft, H.-P., N. Douklias, G. Winzer:
Fehlererkennung in IC-Photomasken durch kohärent-optische Filterung; DGAO-Tagung, Bad Hersfeld 1972 /15
4. Douklias, N., G. Winzer, H. Kiemle:
Holographische Klassifizierung von Fingerabdrücken; DGAO-Tagung, Bad Hersfeld 1972 /48

Erfindungsmeldungen

1. Douklias, N., G. Winzer, U. Wolff:
Vielkanalkorrelator mit sequentiellen kohärent-optischen Trägerfrequenzmodulatoren (vom 7.12.1970)
2. Douklias, N., H. F. Mahlein, G. Winzer:
Kontinuierlich einstellbarer Laserstrahl-Abschwächer (vom 11.6.1971)
3. Douklias, N.:
Schalteranordnung zur schnellen und präzisen Ansteuerung der Kanäle eines Vielkanalkorrelators (vom 17.8.1971)
4. Douklias, N., H. Kiemle, G. Winzer:
Optisches Verfahren zur Klassifizierung von Fingerabdrücken (vom 25.11.1971)
5. Douklias, N.:
Einfache translationsinvariante Lesemöglichkeit für alphanumerische Zeichen (vom 8.3.1972)
6. Douklias, N., R. Oberbacher, G. Widemann:
Optische Anordnung zur Verhinderung des Abbildungsfehlers der Abbildungslinse der Korrelationssignale eines leistungsfähigen holographischen Zeichenerkennungssystems (vom 31.7.1972)
7. Douklias, N.:
Optische Keilanordnung zur Erhöhung der Filterkapazität eines kohärent-optischen Vielkanalkorrelators (vom 26.4.1973)

Für das Zustandekommen der vorliegenden Arbeit haben sich direkt oder indirekt mehrere Dienststellen und Personen der Ludwig-Maximilians-Universität München, der Fa. Siemens AG, München und des Bundesministeriums für Forschung und Technologie beteiligt.

Mein Dank gebührt deshalb an dieser Stelle:

Den Herren Prof. Dr. J. Brandmüller, Priv. Doz. Dr. H.W. Schrötter und Prof. Dr. R. Röhler für die Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit.

Den Herren Dr. E. Hölzler, Prof. Dr. H. Welker und Dr. G. Bretschneider für die mir gebotene Möglichkeit, den experimentellen Teil der Arbeit im Rahmen meiner Tätigkeit im Forschungslaboratorium der Fa. Siemens AG durchführen zu können.

Den Herren Dr. D. Röß, Dr. H. Kiemle, Dr. D. Rosenberger und Dr. G. Zeidler für die Anregung zu dieser Arbeit und ihr förderndes Interesse.

Herrn Dr. G. Winzer für die nützliche Zusammenarbeit und wertvollen Diskussionen.

Herrn Werkstudent R. Lermer für die Unterstützung bei den Messungen zu den Bildern 24 und 25.

Herrn Dr. K.L. Rau für die Durchsicht des Manuskriptes.

Herrn Optikermeister R. Oberbacher für die exakte Ausführung der optischen Feinarbeiten.

Den Herren Ing. G. Eith, Dipl.-Ing. R. Stumpf, Ing. A. Braidt und Dipl.-Ing. Szalay für die Konstruktion der zwei Keilrotationsvorrichtungen.

Dem Meister der Versuchswerkstatt, Herrn W. Wind und seinen Mitarbeitern, für die präzise Ausführung feinmechanischer Arbeiten.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie mit 50 % geförderten Projekts „Neue Technologie“ durchgeführt. Der Bundesminister für Forschung und Technologie übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der Angaben in dieser Arbeit sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

L e b e n s l a u f

Am 12.3.1940 wurde ich, Nikolaos Douklias, als Sohn des Sotirios Douklias und seiner Ehefrau Wassiliki, geb. Konti, in Kertezi/Achaïas (Griechenland) geboren. Nach der Volksschule, die ich in Kertezi absolviert habe, besuchte ich die ersten drei Klassen des Gymnasiums in Kalawryta. Die restlichen Klassen besuchte ich in Athen (achtes Gymnasium), wo ich auch im Juli 1959 die Reifeprüfung ablegte. Nach einer ca. zweijährigen Tätigkeit in Athen und München und Erlernen der deutschen Sprache begann ich im Wintersemester 1961/62 das Studium der Physik an der Universität München, das ich als Stipendiat des Bayerischen Staatsministeriums für Unterricht und Kultus im Juni 1968 mit der Diplomhauptprüfung abschloß. Meine Diplomarbeit über die „Quasikontinuierliche Erregung des stimulierten Ramaneffektes“ fertigte ich unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. J. Brandmüller und Herrn Dr. D. Röß im physikalischen Institut der Universität München bzw. im Zentrallaboratorium für Nachrichtentechnik der Fa. Siemens, München, an. Fast während der gesamten Semesterferien meiner letzten Studienjahre habe ich mich als Werkstudent in verschiedenen Abteilungen der Fa. Siemens, betätigt. In der gleichen Firma beschäftigte ich mich auch nach Abschluß meines Studiums, ein Jahr im Werk für Bauelemente mit Untersuchungen an Magnetdrähten für die elektronische Datenverarbeitung und vier weitere Jahre im Forschungslaboratorium mit den Untersuchungen, deren Ergebnisse zum großen Teil in der vorliegenden Arbeit behandelt werden.

Seit September 1973 bin ich im gleichen Laboratorium an der Herstellung dämpfungsarmer Lichtleitfasern für die optische Nachrichtenübertragung beteiligt.

